COMMISSION GÉOLOGIQUE DU CANADA
ÉTUDE 87-20

LA CARTOGRAPHIE DES FORMATIONS GÉOLOGIQUES EN SURFACE À L'AIDE DE LA TÉLÉDÉTECTION

J.R. Bélanger

1988

Energy, Mines and Resources Canada
Énergie, Mines et Ressources Canada

89-05028/

© Ministre des Approvisionnements et Services Canada 1988

En vente au Canada par l'entremise de nos
agents libraires agréés et autres librairies

ou par la poste au

Centre d'édition du gouvernement du Canada
Approvisionnements et Service Canada
Ottawa, Canada K1A 0S9

et aussi aux:
Bureaux de la commission géologique du Canada,

601, Rue Booth,
Ottawa, K1A 0E8

3303-33rd Street, N.W.,
Calgary (Alberta) T2L 2A7

100, Rue Pender ouest
Vancouver, C.B. V6B 1R8

Un exemplaire en consignation de la présente publication est
également
disponible dans les bibliothèques publiques àtravers le Canada.

Nº de catalogu M44-87/20F Canada: 7,00 $
ISBN 0-660-92417-X Hors Canada: 8,40 $

Prix sujet à changement sans avis préalable

Lecteur
J.-J. Veillette

Manuscrit original reçu le 4 mars 1985
Approbation de la version définitive pour publication, avril 1987

TABLE DES MATIÈRES

1 Résumé/Abstract
2 Introduction
3 La télédétection
3 L'approche qualitative
3 L'approche quantitative
3 Les données spectrales
4 Les signatures spectrales
5 La discrimination spectrale
5 Le traitement des images
5 Le rehaussement
6 La classification des signatures
6 La classification non dirigée
6 La classification dirigée
6 Critique des méthodes
6 La classification non dirigée
7 La classification dirigée
8 L'approche proposée
8 But de l'approche
9 Les régions étudiées
9 L'analyse des signatures
10 Observations
11 Conclusions
12 Les cartes analogiques
12 Production de la carte
14 Le choix des classes
15 Le nombre de classes
16 Analyse des cartes analogiques
16 La reproduction analogique
16 La discrimination
17 Le rôle des indicateurs géobotaniques
17 Une classification exhaustive
17 Des classes continues
17 Commentaires sur les scènes étudiées
18 Conclusions
18 Les cartes thématiques
19 Les étapes de la cartographie
19 Analyse de la carte thématique
19 Conclusion
20 Références

Figures

4	1	Composition des scènes MSS des LANDSAT 1, 2 et 3
4	2	Exemples de signatures spectrales
7	3	Identification de la position des différents types de peuplements d'arbres sur le nuage spectral de la scène des Cantons et l'Est
7	4	Identification de la position des phénomènes géologiques sur les nuages spectraux de la scène du lac Kaminak
7	5	Identification de la position des données de terrain sur les nuages spectraux de la scène de l'île du Roi-Guillaume (les nombres correspondent aux classes décrites à la fig. 22)
en pochette	6	Regroupement des signatures d'une partie de la scène du lac Kaminak réalisé à l'aide de la méthode des composantes principales
en pochette	7	Regroupement des signatures d'une partie de la scène du lac Kaminak réalisé à l'aide de la méthode analogique
9	8	Les régions étudiées
10	9	Histogramme de la scène des Cantons de l'Est du Québec
11	10	Histogramme de la scène du lac Kaminak
12	11	Histogramme de la scène de l'île du Roi-Guillaume
13	12	Corrélogrammes de la scène des Cantons de l'Est du Québec
14	13	Corrélogrammes de la scène du lac Kaminak
15	14	Corrélogrammes de la scène de l'île du Roi-Guillaume
16	15	Anomalies, sur un histogramme, dans la réflectance des pixels
16	16	Anomalies, sur un corrélogramme, dans la réflectance des pixels
en pochette	17	Formation des classes spectrales, méthode analogique
en pochette	18	Reproduction et légende de la scène des Cantons de l'Est du Québec
en pochette	19	Reproduction et légende de la scène du lac Kaminak, Territoires du Nord-Ouest
en pochette	20	Reproduction de la scène de l'île du Roi-Guillaume, district de Franklin
17	21	Superficie de la carte couverte par les classes spectrales
en pochette	22	Légende et carte interprétée de l'île du Roi-Guillaume

LA CARTOGRAPHIE DES FORMATIONS GÉOLOGIQUES EN SURFACE À L'AIDE DE LA TÉLÉDÉTECTION

Résumé

L'interprétation des données de télédétection présente certains problèmes en géologie puisque la discrimination spectrale entre les phénomènes ne varie pas nécessairement en fonction des thèmes que l'utilisateur souhaite traiter. Certains de ces problèmes (tels que les signatures spectrales incomplètes, la résolution grossière des pixels ou l'interférence de l'atmosphère) sont d'ordre technique et échappent au contrôle de l'utilisateur. Cependant d'autres difficultés peuvent être dues à l'approche ou aux méthodes utilisées pour extraire l'information voulue des données spectrales: l'approche qualitative ne permet pas une analyse précise des images alors que l'approche quantitative (basée sur une discrimination mathématique des signatures spectrales) ne réussit que rarement à établir une discrimination géologique. Les méthodes supervisées de classification des signatures basent la discrimination uniquement à partir de données de terrain alors que celles-ci n'ont pas nécessairement d'équivalent au niveau de la discrimination spectrale; les méthodes non supervisées, ayant recours à une discrimination mathématique entre les signatures pour former les thèmes n'ayant pas nécessairement d'équivalent géologique.

Dans la présente étude, on se sert donc d'une approche à la fois quantitative pour le traitement des images et qualitative pour l'interprétation des classes spectrales. Les classes spectrales sont formées à l'aide d'une classification semi supervisée, c'est-à-dire que les signatures sont regroupées en tenant compte à la fois de la discrimination spectrale et des thèmes voulus par l'utilisateur. Trois scènes MSS de Landsat situées dans des contextes géographiques différents, soit celles des Cantons de l'Est du Québec, du lac Kaminak dans le Keewatin et de l'île Roi-Guillaume dans le District de Franklin, ont servi à illustrer les différentes approches et méthodes proposées.

L'analyse des scènes montre qu'il est préférable de combiner les approches et les méthodes d'analyse et d'interprétation afin d'adapter la discrimination spectrale au contexte géographique et géologique.

Abstract

The interpretation of remote sensing data presents particular problems in geology since the spectral discrimination of phenomena does not necessarily vary according to the user's topics. Some of these problems such as incomplete spectral signatures, gross pixel resolution, or atmospheric interference, are technical in nature and thus beyond the user's control. Other difficulties however can be caused by the approach or methods used to extract information from spectral data. The qualitative approach does not allow for the precise analysis of images whereas the quantitative approach, wich is based on a mathematical discrimination of spectral signatures, rarely permits the establishement of a geological discrimination. The supervised methods of signature classification base discrimination only on field data which do not necessarily have an equivalent at the level of spectral discrimination; the establishment of themes using unsupervised methods, based on mathematical discrimination of signatures does not necessarily have a geological equivalent.

This report uses an approach that is both quantitative for image processing and qualitative for spectral class interpretation. Spectral classes are established using a semi-supervised classification, that is, signatures are grouped by taking in account spectral discrimination and user topics. Three MSS Landsat scenes of the Eastern Townships of Quebec, Lake Kaminak in District of Keewatin, and King William Island in District of Franklin are used.

It is preferable to combine approaches and methods of analysis and interpretation in order to adapt spectral discrimination to the geographic and geological context.

INTRODUCTION

Les nouvelles techniques d'enregistrement et d'analyse d'images, introduites au début des années 60, ont révolutionné le monde de la photo-interprétation et ont donné naissance à une nouvelle discipline que l'on a appelé la « télédétection ». Sans chercher à vouloir remplacer la photo-interprétation traditionnelle, la télédétection est venue élargir les cadres de cette dernière en introduisant de nouveaux types de vecteurs, comme les satellites, en couvrant une plus grande partie du spectre électromagnétique, y compris les régions invisibles, et en procédant à l'enregistrement numérique de la réflectance des objets. Allant de pair avec les techniques d'enregistrement, on a aussi mis au point une méthodologie pour l'analyse et l'interprétation des données spectrales; une nouvelle approche de traitement des données de télédétection s'imposait afin de pouvoir reproduire des données se rapportant aux régions invisibles du spectre et à cause de la nature numérique de l'enregistrement des signatures spectrales. Ainsi, le terme télédétection comprend autant les techniques d'enregistrement des images que les méthodes utilisées pour les analyser.

L'auteur du présent rapport se propose d'évaluer le rôle de la télédétection dans les études de la géologie des formations en surface en mettant l'accent sur les plus récentes mises aux point qui distinguent la télédétection de la photo-interprétation classique. À cette fin, le texte portera, dans un premier temps, sur les différentes techniques et méthodes propres à la télédétection puis, dans un deuxième temps, proposera une approche susceptible de répondre aux besoins de la cartographie des formations géologiques en surface à l'aide d'exemples types illustrant les différents concepts de la télédétection ainsi que les avantages et limites de cette discipline.

Depuis la consécration du terme « télédétection » en 1960 (Estes et Senger 1974, préface), cette discipline a fait d'énormes progrès autant au niveau des capteurs que des vecteurs et des méthodes d'interprétation; cependant, ce n'est qu'avec l'arrivée, en 1972, des satellites LANDSAT, alors appelés ERTS (Earth Resource Technology Satellites), que la télédétection a vraiment retenu l'attention des spécialistes. Dans certains domaines tels qu'en foresterie, en agriculture ou en aménagement du territoire, la télédétection peut être utilisée efficacement puisque l'interprétation peut se faire directement à partir des phénomènes situés à la surface du globe. En géologie cependant, l'utilisation de la télédétection est beaucoup plus laborieuse puisqu'il s'agit d'interpréter des phénomènes n'affleurant que partiellement à la surface terrestre et qu'il faut souvent utiliser des moyens détournés, tel que le drainage, la géobotanique ou les formes du relief, pour interpréter les phénomènes sous-jacents. Il est donc important en géologie, principalement en ce qui a trait à la cartographie des formations en surface, de pouvoir baser l'interprétation des images à partir, non seulement de la texture (ou signature spectrale) des phénomènes, mais aussi à partir de la structure, c'est-à-dire de leur apparence tridimensionnelle, tels qu'ils apparaissent sur le terrain.

En télédétection, il existe deux approches au traitement des images: l'une qualitative et l'autre quantitative. Dans le cas de l'approche qualitative, les images sont enregistrées et reproduites sous forme analogique, comme les photographies aériennes classiques, et l'interprétation se fait à partir des différentes teintes et formes apparaissant sur l'image. Dans le cas de l'approche quantitative, les images sont enregistrées sous forme numérique et l'interprète se sert d'algorithmes mathématiques pour regrouper les signatures en classes spectrales et analyser les différentes composantes du paysage.

L'approche qualitative a l'avantage de présenter au géologue un paysage familier dont la ressemblance avec l'aspect véritable du terrain lui permet d'utiliser son expérience pour dépasser l'identification directe des signatures spectrales individuelles et se servir du contexte régional pour interpréter les formations géologiques. Cette approche, soit celle de la photo-interprétation classique, a peu changé depuis l'avènement de la télédétection sauf en ce qui à trait à l'utilisation de longueurs d'ondes appartenant à la région invisible du spectre. L'utilisation des satellites a permis une plus grande couverture des images et a minimisé les distortions optiques, cependant la définition des images est plus grossière et la technique actuelle n'offre pas de couverture stéréo.

L'approche quantitative, d'autre part, a connu un développement rapide depuis le début des années 60, autant au niveau de la technique d'enregistrement que des méthodes d'analyse. L'enregistrement numérique des signaux électromagnétiques a rendu possible non seulement l'analyse et la définition précise des signatures spectrales des phénomènes, mais aussi le recours, par traitement mathématique, à plusieurs types de rehaussement d'image. L'approche quantitative pose cependant certains problèmes au géologue au niveau de l'interprétation puisque les différentes composantes de l'image, ou classes spectrales, sont formées à partir de critères mathématiques et non à partir d'une discrimination géologique.

Bref, il est très important pour le géologue de comprendre non seulement les méthodes d'analyse, mais aussi la nature des données de base et de comprendre les limites de la télédétection appliquée aux études géologiques, principalement en ce qui a trait à la cartographie des formations en surface.

NOTA: Au moment de la rédaction du présent rapport, les données TM (Thematic Mapper) de LANDSAT n'étaient pas encore disponibles pour les régions étudiées; les exemples proviennent donc de données MSS qui, bien que moins précises, sont semblables aux données TM.

LA TÉLÉDÉTECTION

L'object de la télédétection est de « déceler les propriétés des objects sans venir en contact avec eux » ; cette discipline inclut autant les techniques d'enregistrement des données que les méthodes d'analyse et d'interprétation de ces données (Steiner 1972, p. 119; Stone 1974, p. 7). Bien qu'on associe très souvent la télédétection à l'analyse des images LANDSAT, ce terme s'applique autant à l'interprétation de photographies aériennes classiques qu'à celle de tout autre type d'images, soit qu'elles proviennent de vecteurs aéroportés ou de satellites, soit qu'elles aient été enregistrées sous forme analogique ou numérique. Ainsi, le présent rapport fait état autant des méthodes traditionnelles de photo-interprétation que des techniques récentes puisqu'il s'agit d'évaluer l'apport des nouvelles mises au point dans le domaine de la télédétection. Il ne s'agit cependant pas de procéder à un inventaire complet des données techniques et de la théorie de la télédétection mais plutôt de décrire et d'évaluer le matériel et les approches actuellement disponibles au géologue.

Le premier chapître portera sur les deux différentes approches, soit quantitative et qualitative, utilisées présentement en télédétection pour l'enregistrement et l'analyse des données spectrales. Bien que la frontière entre les deux approches soit imprécise et que les deux approches soient d'ailleurs souvent complémentaires, il reste que le point de départ, ou principe de base de chacune d'elles est très différent et qu'il constitue la principale distinction entre la photo-interprétation traditionnelle et la télédétection (Hajic et Simonett 1976, p. 378).

L'approche qualitative

Dans le cas de l'approche qualitative, les images sont enregistrées et reproduites sous forme analogique, comme les photographies aériennes, et l'interprétation se fait à partir des différentes textures (teintes) et structures des phénomènes apparaissant sur l'image. Les photographies aériennes classiques, en noir et blanc ou en couleurs, ont l'avantage de présenter au géologue un modèle du terrain en trois dimensions et de présenter la texture et la structure des phénomènes telles qu'elles apparaissent en réalité. Le paysage familier qui se présente ainsi au géologue lui permet une interprétation plus aisée des phénomènes à partir autant de la texture que des formes du relief car, en faisant appel à son expérience, il parvient non seulement à dépasser l'identification directe des signatures spectrales individuelles mais aussi à se servir du contexte régional pour établir les limites entre les différentes formations géologiques et ceci selon une discrimination voulue (Gagnon 1974, American Society of Photogrammetry 1960). Les images analogiques peuvent être enregistrées soit sur pellicule à l'aide d'un appareil photographique, soit sur bande magnétoscopique. Bien qu'il existe plusieurs types de vecteurs aéroportés ou sur orbite (ballons, avions, satellites LANDSAT ou SKYLAB, etc.), les deux principaux vecteurs utilisés pour l'interprétation géologique sont les avions, volant à haute ou basse altitude pour les photographies aériennes, et les satellites LANDSAT, fournissant les images RBV (return beam vidicon, ou vidicon à retour de faisceau).

Le système RBV de LANDSAT fonctionne sur le même principe que les caméras de télévision, toutefois les capteurs enregistrent la réflectance des objects sur les longueurs d'onde de 0,475 à 0,575 (bleu vert), de 0,580 à 0,680 (jaune rouge), et de 0,680 à 0,830 (proche infrarouge) micromètres. Chaque scène RBV couvre une superficie de 186 sur 186 km dans le cas de LANDSAT 1 et 2 et de 98 sur 98 km dans le cas de LANDSAT 3. La résolution spatiale, ou grandeur des pixels (voir la section portant sur l'approche quantitative), est de 50 sur 50 m dans le cas de LANDSAT 1 et 2 et de 30 sur 30 m dans le cas de LANDSAT 3. Les images RBV peuvent jouer un rôle important dans les études de reconnaissance, à des échelles inférieures à 1/ 100 000, grâce à la grande superficie de terrain qu'elle couvrent, au peu de distortion des images, à l'utilisation de plusieurs longueurs d'onde et à la disponibilité d'images multidates. Deux facteurs restreignent cependant leur utilité, soit la définition grossière des pixels (picture elements) et le manque de couverture stéréoscopique.

L'approche qualitative offre donc certains avantages au niveau de l'interprétation mais l'enregistrement analogique des images prive l'interprète d'une foule d'analyses et d'accentuations basées sur des mathématiques pouvant mettre en relief certaines textures et structures de l'image et l'empêche donc de définir avec précision certaines composantes du paysage.

L'approche quantitative

Ce type d'approche utilise des données spectrales enregistrées sous forme numérique et se sert d'algorithmes mathématiques pour l'analyse de l'image. Le traitement numérique peut porter sur un simple rehaussement de la qualité de l'image afin d'en faire ressortir les différentes caractéristiques; dans ce cas, l'interprétation se fait de façon analogique comme dans le cas de l'approche qualitative. Un second type de traitement consiste à regrouper les signatures en classes spectrales afin de simplifier l'aspect du paysage et ainsi faciliter l'interprétation. Et enfin, un troisième peut porter sur un regroupement des signatures selon une discrimination dérivée de données de terrain.

Pour utiliser efficacement la méthode quantitative dans l'analyse des scènes multibandes, il faut que l'interprète connaisse la nature des données de base (les signatures spectrales) et qu'il puisse évaluer la pertinence des différents types de traitement ainsi que leurs limites; c'est pourquoi on expliquera dans un premier temps les principes de base sous-jacents à la méthode quantitative, soit la nature des signatures et la discrimination spectrale.

Les données spectrales

Les données spectrales utilisées dans l'approche quantitative proviennent de capteurs multibandes ou MSS (multispectral scanners) placés à bord d'avions ou des satellites LANDSAT. Depuis 1972, les États-Unis ont lancé cinq satellites LANDSAT dont la mission est de fournir des images de la terre de façon continue afin d'obtenir des données sur les ressources terrestres, d'où le nom original

de ERTS (Earth Resource Technology Satellite), que l'on a par la suite rebaptisé LANDSAT. Pour ce faire, on a placé les satellites à une altitude de 917 km sur une orbite quasipolaire et synchronisée avec le soleil; ainsi, au cours de la trajectoire nord-sud, le satellite se trouve du côté éclairé de la terre alors que la trajectoire sud-nord s'effectue du côté obscur. Grâce au mouvement de rotation du globe, le satellite peut photographier la surface terrestre par tranche successive à chaque trajectoire descendante. Cette technique permet ainsi d'obtenir une image complète de la terre à tous les 18 jours.

Les images MSS sont enregistrées à l'aide de capteurs multibandes qui, lors de la trajectoire descendante, balayent la surface du globe dans la direction ouest-est de façon à enregistrer une image continue formée de lignes couvrant chacune une portion de terrain de 79 m sur 185 km. Les lignes sont ensuite subdivisées en 3 240 sections, à superficie normale de 57 sur 79 m, appelées pixels. Les capteurs MSS enregistrent la réflectance des objets sur quatre longueurs d'onde appelées canaux 4, 5, 6 et 7 par la NASA. Les régions du spectre couvertes par les canaux sont données à la figure 1.

Les données de réflectance sont corrigées et quantifiées (sur une échelle de 0 à 64) puis transmises sur terre pour y être enregistrées sur bande magnétique ordinolingue. Les données magnétoscopiques traitées par le Centre canadien de télédétection sont disponibles sur bande magnétique ou CCT (Computer compatible tapes) et la réflectance a été étalée sur 256 niveaux. Les scènes MSS des LANDSAT se composent donc de 2 286 lignes contenant chacune 3 240 colonnes; en tout, on dispose ainsi d'un total de 7 406 640 pixels et pour chacun des pixels, il existe quatre valeurs de réflectance correspondant aux canaux 4, 5, 6 et 7 (voir fig. 1).

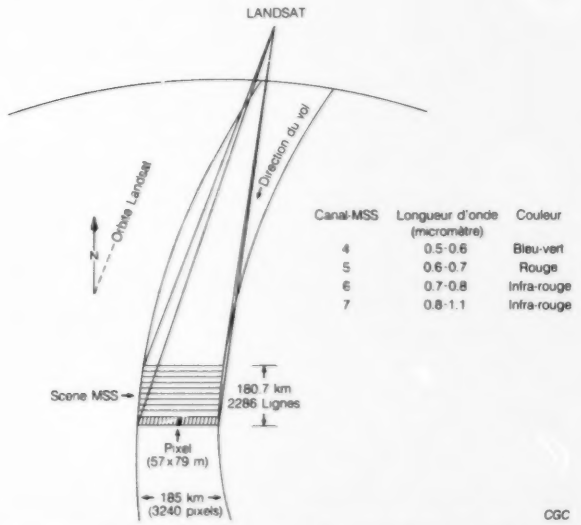

Figure 1. Composition des scènes MSS des LANDSAT 1, 2 et 3. Chaque scène est composée de 3240 sur 2386 pixels; chaque pixel couvre une superficie de terrain de 57 sur 79 m et a une signature spectrale formée des canaux 4, 5, 6 et 7.

On a ajouté à bord des LANDSAT 4 et 5 une nouvelle génération de capteurs MSS à résolution spectrale et spatiale améliorée que l'on a baptisé « Thematic Mapper » (TM). Ces nouveaux capteurs enregistrent les réflectances spectrales sur sept longueurs d'ondes et les pixels correspondent à une superficie de 30 sur 30 m sur le terrain. Les dimensions des scènes sont sensiblement le mêmes que pour les données MSS.

Les signatures spectrales

En télédétection, le terme signature spectrale s'applique à la réflectance ou à une émission électromagnétique, unique, caractérisant un objet ou un groupe d'objets (Estes et Senger 1974, p. 308). Théoriquement, chaque objet possède une courbe de réflectance (ou courbe électromagnétique) aussi unique qu'une empreinte digitale. Pour être unique, il faut cependant que la signature couvre le spectre électromagnétique entier, sinon elle peut être confondue avec la signature de certains autres objets. Or, les contraintes techniques actuelles empêchent l'enregistrement complet et précis de la signature des objets limitant ainsi l'analyse et l'interprétation des scènes spectrales. Les principaux facteurs affectant les signatures sont les suivants:

1. Les signatures incomplètes: la technique actuelle en télédétection ne permet pas d'enregister la courbe de réflectance électromagnétique complète des objets; ainsi, on procède par échantillonnage des courbes de réflectance à intervalles définis, puis on reconstitue les signatures à partir de ces points de contrôle.

   Dans le cas de certains vecteurs aéroportés, on inclut plusieurs systèmes de détection, aussi bien actif que passif, afin de couvrir une grande partie du spectre électromagnétique (Estes 1974 ; Harper 1976). Cependant, le système MSS de LANDSAT 1, 2 et 3 n'enregistre la réflectance des objets que sur quatre longueurs d'onde (fig. 2); il en résulte une réduction du nombre de points de contrôle des signatures spectrales, ce qui à pour effet d'augmenter le risque de confusion entre les différents phénomènes.

2. La résolution: ce facteur, lié à la grosseur des pixels ou des grains en photographie classique, pose peu de

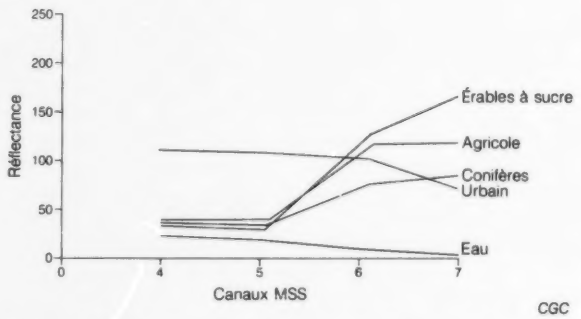

Figure 2. Exemples de signatures spectrales enregistrées par les capteurs MSS de LANDSAT, scène des Canton de l'EST.

problèmes lorsqu'il s'agit de systèmes aéroportés à cause de la courte distance entre les capteurs et le terrain. Cependant, la résolution grossière des pixels sur les scènes LANDSAT occasionne plusieurs problèmes au niveau de la signature spectrale puisqu'il est impossible d'obtenir une signature exacte de tout objet de taille inférieure à 57 sur 79 m (dans le cas des LANDSAT 1, 2, 3) et que les pixels chevauchent souvent deux ou même plusieurs phénomènes différents. Le manque de définition des signatures rend très difficile l'identification des phénomènes à partir de leur structure (comme le contact entre deux formations géologiques différentes), ou l'identification de phénomènes dont une des dimensions est inférieure à celle d'un pixel (p. ex. les eskers, drumlins, etc.; voir la section portant sur les cartes analogiques). Enfin, l'impossibilité d'obtenir des signatures précises des objets complique la comparaison entre elles des différentes scènes LANDSAT; même en parvenant à corriger les images au niveau des distorsions géométriques et optiques, la comparison de deux scènes n'est possible qu'au niveau de zones homogènes très étendues (Lodwick 1978).

3. L'interférence de l'atmosphère et l'éclairage: L'interférence due au taux de diffusion, de réflection et d'absorption des rayons solaires par l'atmosphère joue un rôle important sur la qualité des images LANDSAT à cause de la grande distance séparant les capteurs de la surface terrestre. Cette dernière non seulement diminue la qualité des ondes captées par les senseurs mais restreint aussi l'échantillonnage du spectre électromagnétique à quelques fenêtres atmosphériques à degré d'interférence moins élevé (Estes 1974, p. 21; Lintz et Simonett 1976; Turner 1973). De plus, le fait que les conditions atmosphériques varient d'une image à l'autre rend difficile la comparison des signatures d'un même phénomène d'une scène à une autre.

   D'autre part la trajectoire des LANDSAT est synchronisée avec le soleil de sorte que le satellite traverse l'équateur à 09h 30; à cette heure, l'angle prononcé du soleil accentue les ombrages créés par le relief et occasionne des variations entre les signatures spectrales de phénomènes semblables (American Society of Photogrammetry 1963).

4. Problèmes techniques: il faut enfin prendre en considération dans l'analyse des scènes LANDSAT les variations dues aux défauts mécaniques des capteurs. Ces variations sont causées soit par l'usure, soit par une variation dans la sensibilité des capteurs d'un satellite à un autre, ou encore par des fluctuations au niveau du calibrage des capteurs.

La discrimination spectrale

En photo-interprétation (effectuée à partir de photographies aériennes) le géologue regroupe les différents phénomènes selon leur texture et leur structure tridimensionnelle en se servant de ses connaissances géologiques. L'interprète peut donc faire abstraction de certains phénomènes, (comme la végétation) apparaissant sur l'image et arriver à une classification correspondant à des thèmes géologiques sans se préoccupper de l'interférence de phénomènes étrangers à sa discipline.

L'interprétation des scènes MSS de LANDSAT se fait à partir de la texture de l'image et de la structure bidimensionnelle des phénomènes à cause du manque de couverture stéréo des images; l'analyse et la classification se fait à partir des signatures apparaissant sur l'image. Or, outre l'enregistrement des réflectances appartenant à des parties invisibles du spectre, les balayeurs MSS enregistrent les signatures de tous les objets dans leur champ de vision sans distinction au niveau de leur signification. Par conséquent, les images présentent une foule d'informations se rattachant à une multitude de thèmes, et les phénomènes représentés ne correspondent pas nécessairement aux catégories que l'utilisateur souhaite distinguer, compte tenu de sa discipline. Cette nouvelle discrimination peut semer la confusion ou encore être bénéfique puisqu'elle peut apporter une information supplémentaire non familière au géologue. On peut donc parler de « néotaxonomie » (David et coll. 1977, p. 560), liée à la discrimination spectrale.

LE TRAITEMENT DES IMAGES

Le rehaussement

L'enregistrement numérique des signatures spectrales permet plusieurs types de traitement des images visant soit à corriger certaines distorsions ou bruits, soit à améliorer la qualité ou soit à faire ressortir certaines composantes que l'oeil humain ne pourrait discerner. Certains de ces rehaussements visent à améliorer l'image en conservant l'aspect analogique des signatures alors que d'autres modifient l'aspect de l'image en soumettant les signatures à des transformations mathématiques (voir Hajic et Simonett 1976, chapître II; Condit et Chavez 1979, Simonett 1974; Bruce et Singhroy 1984).

Le rehaussement analogique se sert d'un traitement mathématique pour accentuer le contraste de l'image mais conserve une certaine analogie entre l'image originale et l'image rehaussée. Le rehaussement analogique a l'avantage de présenter au géologue un paysage familier qu'il peut interpréter à partir de ses connaissances du terrain. Parmi les différents types de rehaussement analogique, on compte l'accentuation à partir d'étirement d'histogrames ou de corrélogrammes (voir la section portant sur la production de la carte) et le lissage des images à l'aide de filtres, tel que la moyenne mobile, pour faire ressortir les limites entre les différentes zones, homogènes (Hajic et Simonett 1976, p. 386).

L'accentuation par transformation mathématique cherche à mettre en évidence certaines structures de l'image sans se préoccupper de préserver l'aspect analogique des signatures spectrales. Les accentuations peuvent être obtenues par la combinaison d'images ou de différent canaux MSS, par des transformations mathématiques des

signatures (transformations de Laplace [Steiner 1972]) ou encore par tout autre algorithme servant à mettre en relief certains aspects de l'image. Les transformations mathématiques des données originales peuvent faire ressortir certains traits de l'image, comme les failles et les différents types de formations géologiques, mais demande à l'interprète une connaissance approfondie des principes régissant le traitement des images car l'aspect original des données est altéré tant et si bien que toute correspondance entre la réflectance originale et les teintes apparaissant sur l'image disparaît.

La classification des signatures

Les scènes MSS se composent d'environ 7 500 000 pixels et la signature de chaque pixel regroupe quatre valeurs de réflectance (canaux MSS) pouvant varier entre 0 et 255; on peut donc théoriquement retrouver sur chaque scène 256^4 ou encore 7,5 millions signatures ou vecteurs différents. Bien qu'il soit possible de réduire le nombre de signatures à 6 000 sans changer l'aspect de l'image (Shlien et Goodenough 1974), il reste que l'oeil humain ne peut distinguer un nombre aussi grand de classes ou de teintes sur une même image. Aussi, pour simplifier l'interprétation des images MSS, on a mis au point différentes techniques de regroupement des signatures en classes spectrales. Chacune de ces méthodes, basée soit sur une discrimination spectrale (classification non dirigée), soit à partir de données de terrain (classification dirigée), cherche à regrouper les signatures en classes susceptibles de représenter différents phénomènes ou thèmes sur le terrain. séparation de signatures en se basant sur le canal 7.

La classification non dirigée

La classification spectrale considère les signatures comme des vecteurs à n dimensions et base le regroupement uniquement sur la ressemblance spectrale des signatures sans se soucier au départ de la signification des classes. Le principe de base de la classification spectrale (ou non dirigée) veut que des phénomènes semblables aient des signatures spectrales semblables et que chaque noyau cohésif sur le plan statistique (Alfoldi 1978) corresponde à un phénomène précis sur le terrain.

Il existe plusieurs algorithmes mathématiques pour analyser les nuages statistiques (p. ex. Braconne et coll. 1974; Taylor 1973; Fontanel et coll. 1976); chacun offre ses avantages particuliers mais aucun ne peut être considéré comme universel (Turner 1973).

La classification dirigée

Dans ce type de classification les classes sont définies à partir de phénomènes identifiés à l'avance en se servant de cibles du terrain ou de zones homogènes reconnues sur les images. La classification procède en trois étapes: on choisit premièrement un certain nombre de signatures spectrales (échantillons) représentatives des classes que l'on veut former, on identifie ensuite les caractéristiques de chacune des classes et, enfin, on regroupe les pixels de la région étudiée à partir des caractéristiques propres aux échantillons sélectionnés. Les caractéristiques des classes peuvent être exprimées soit par des paramètres statistiques (méthode paramétrique, p. ex.: maximum de vraisemblance, dans Reeves 1977, et Goodenough 1976) soit, si l'on considère des signatures comme des vecteurs à dimensions, selon la position absolue dans l'espace des coordonnées spectrales (méthode non paramétrique, p. ex.: la fonction discriminante dans Steiner 1972, ou parallélipipède dans Alfodi 1978).

Critique des méthodes

La classification non dirigée

Le regroupement des signatures à partir de leur ressemblance spectrale peut réussir à faire ressortir certaines composantes du paysage de façon efficace et, peu importe la technique de regroupement utilisée, les résultats demeurent sensiblement les mêmes (David et coll. 1977, Brun et coll. 1974). En géologie, une classification essentiellement spectrale des signatures pose certains problèmes puisque les classes géologiques peuvent ne pas avoir leur équivalent sur le plan spectral; ce manque de correspondance peut être dû aux facteurs suivants:

1. La discrimination spectrale peut donner de bons résultats pour les pixels (ou signatures) ayant un haut niveau d'appartenance aux noyaux bien définis, cependant, lorsque les pixels s'éloignent des centres de gravité, leur appartenance à une classe précise devient beaucoup plus aléatoire jusqu'au point où des zones grises se forment et il devient alors impossible de rattacher ces pixels à une classe particulière. Sur les figures 3, 4 et 5, certains nuages peuvent être facilement identifiés, comme l'eau, la glace et la terre; il est cependant plus difficile de rattacher à une classe particulière les signatures situées en marge de ces principaux nuages.
2. Un même nuage d'allure gaussienne peut renfermer plusieurs phénomènes distincts, et certains d'entre eux peuvent passer inaperçus puisqu'ils ne forment pas de sous-nuages identifiables mathématiquement. Une classification non dirigée basée sur le regroupement des composantes principales (Taylor 1973) a réussi à identifier les noyaux principaux mais les autres classes spectrales pouvaient difficilement être rattachées à un phénomène particulier sur le terrain (fig. 6.)
3. Certains nuages peuvent être séparés de façon artificielle à cause de problèmes techniques (Bélanger 1980) (voir plus loin l'analyse des signatures).
4. En regroupant les signatures autour d'un nombre limité de noyaux, on risque de laisser tomber certaines classes moins distinctes au niveau statistique mais susceptibles d'avoir une signification géologique importante. Ainsi, par exemple, un esker ou une plage peuvent passer inaperçus ou être confondus avec d'autres classes plus grandes.

5. La classification non dirigée considère les classes spectrales comme des phénomènes discrets, alors qu'en réalité les signatures correspondent à des phénomènes continus. Tel qu'on peut le remarquer sur les figures 3 et 5, il n'existe aucune limite définie entre les signatures des différents phénomènes mais il s'agit plutôt d'une progression continue entre les différents nuages. Ce fait est dû à l'imprécision des signatures et à la nature même des phénomènes: la composition granulométrique et le drainage d'une formation peut varier progressivement d'un endroit à un autre sans qu'il y ait pour cela changement abrupt dans la signature. Ainsi les limites, trop souvent imprécises, peuvent difficilement être définies à priori (Robinove 1981).

Il est donc important à cause de l'imprécision des signatures spectrales et de la nature des phénomènes de pouvoir déceler sur une carte la transition entre les différents noyaux statistiques et permettre ainsi à l'interprète de rattacher les pixels à un groupe ou à un autre en se basant sur le contexte spatial ou sur son expérience, ou même de pouvoir conserver certaines classes transitoires entre deux phénomènes bien définis.

L'interprétation géologique d'une scène LANDSAT peut difficilement se faire en se servant de modèles mathématiques définis à l'avance à cause de la complexité des variations dans la géologie d'un endroit à l'autre et des variations dans la signature spectrale d'un même phénomène sur différentes scènes de télédétection. Les variations spectrales peuvent être dues à des facteurs du milieu (sol, végétation, climat, saison, ou autre), à l'illumination selon l'angle du soleil, à des facteurs atmosphériques ou encore à des causes techniques. Il est donc important d'utiliser une méthode de classification souple, pouvant s'adapter à différentes conditions de terrain.

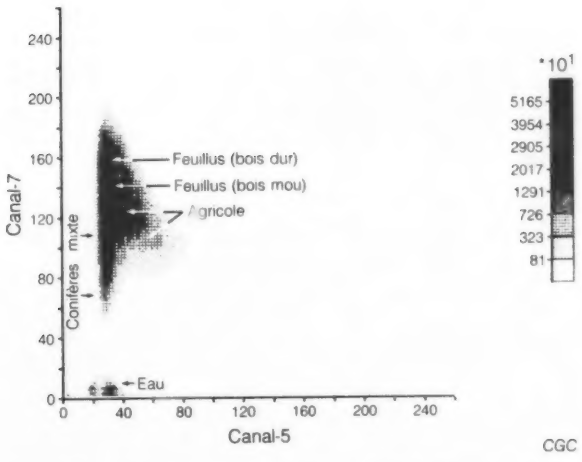

Figure 3. Identification de la position des différents types de peuplements d'arbres sur le nuage spectral de la scène des Cantons de l'Est.

La classification dirigée

Le regroupement dirigé des signatures spectrales se fait à partir d'échantillons représentant les différentes classes désirées; les échantillons peuvent venir de données de terrain ou de zones homogènes sur les images de télédétection. Grâce à l'intervention de l'opérateur dans le choix des thèmes et des limites entre les différentes classes, cette approche permet d'identifier précisément certains phénomènes et d'arriver à des cartes thématiques répondant en partie aux besoins des géologues (Rencz et Shilts 1981).

La classification dirigée rencontre cependant certains problèmes en géologie, notamment:

1. Le manque d'équivalence entre les thèmes géologiques et les classes spectrales: la classification dirigée part de thèmes definis à l'avance et essaie d'appliquer

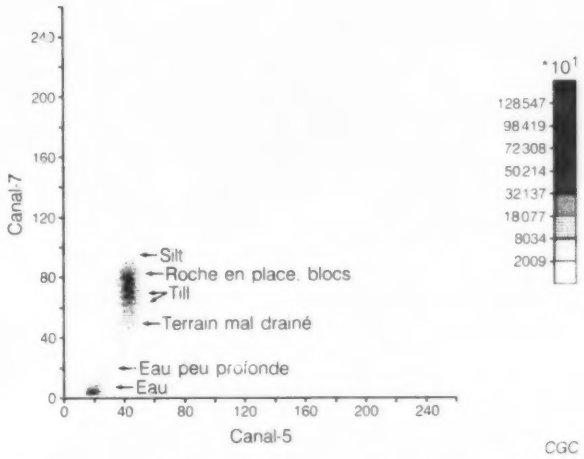

Figure 4. Identification de la position des phénomènes géologiques sur les nuages spectraux de la scène du lac Kaminak.

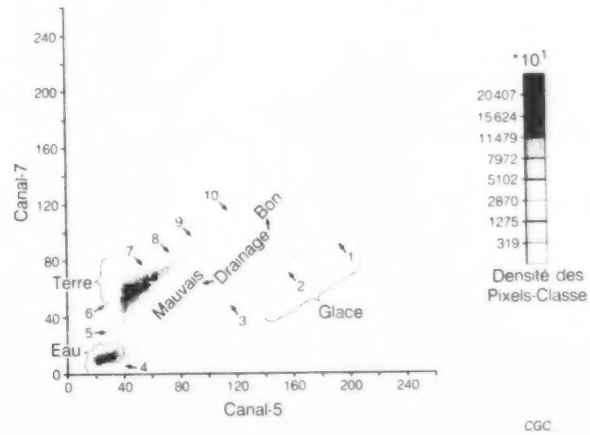

Figure 5. Identification de la position des données de terrain sur les nuages spectraux de la scène de l'île du Roi-Guillaume (les nombres correspondent aux classes décrites à la fig. 22).

ceux-ci à des données spectrales; or, rien n'indique que des thèmes géologiques ont leur équivalence au niveau de la discrimination spectrale. Ce manque d'équivalence entre les deux types de classification peut être dû:

- à une discrimination entre les phénomènes non familiers au géologue, liée à des longueurs d'onde non visibles, comme l'infrarouge sur les scènes MSS;
- à des signatures ne correspondant à aucun phénomène précis à cause du chevauchement de certains pixels sur deux phénomènes différents;
- à un manque de discrimination entre les phénomènes à cause de signatures incomplètes;
- à la difficulté de trouver des zones homogènes sur les cartes; et,
- à la difficulté de trouver des échantillons représentatifs des classes (Shlien 1974 et Goodenough, Saint 1974, Fontanel et coll. 1976, Braconne et coll. 1974).

2. La difficulté d'analyser l'ensemble des composantes d'une scène: en photo-interprétation, il est rare qu'une formation géologique corresponde à une teinte ou une couleur précise et unique à cause de variations dans le drainage, dans l'éclairage, dans la couverture végétale, ou autre; par conséquent, l'interprétation doit se faire autant à partir de la structure des formations et du contexte environnant qu'à partir des signatures spectrales. Or, la classification dirigé n'a recours qu'à la signature spectrale pour identifier les différents phénomènes. Il existe donc un risque de confusion entre les différentes classes, et même si le géologue réussit à identifier certaines formations à l'aide de la signature spectrale, il est difficile, voire impossible, de prévoir toutes les variations spectrales d'une même formation ainsi que les classes spectrales transistoires entre deux formations principales (voir la section portant sur l'analyse des signatures).
3. Le temps requis pour la classification: contrairement à la classification essentiellement spectrale (non dirigé) où la majeure partie du travail est effectuée par l'ordinateur, la classification thématique requiert une intervention importante de la part de l'opérateur durant l'étape du choix et de la définition des classes. Lorsque les thèmes peuvent être identifiés facilement à partir de zones homogènes sur l'image, le temps requis pour l'interprétation est relativement court. Cependant, lorsque la classification est plus complexe, comme en géologie, l'interprète doit multiplier l'échantillonnage et souvent adapter de façon itérative l'échantillonnage à la discrimination spectrale. Ainsi, même pour un paysage relativement facile à interpréter tel que celui du lac Kaminak, il a fallu plusieurs semaines de travail d'échantillonnage et d'essais cartographiques avant d'en arriver à la carte géologique présentée dans Rencz et Shilts, 1981. Le temps requis pour contrôler les échantillons peut facilement être justifié lorsqu'il s'agit de projets de recherche, mais cette façon de procéder devient beaucoup moins rentable lorsqu'il s'agit de projets suivis.

L'APPROCHE PROPOSÉE

L'utilisation de la télédétection, autre que la photo-interprétation classique, est devenue chose courante en géologie et peut s'avérer avantageuse dans certains cas (il suffit de regarder les sections réservées aux expériences géologiques à l'occasion de colloques internationaux et nationaux en télédétection). L'utilisation des scènes MSS est cependant beaucoup moins répandue dans les projets de cartographie des formations en surface et souvent les études demeurent expérimentales et ne s'appliquent qu'à des cas particuliers. Tel que rapporté dans Boydell 1974, l'analyse multispectrale peut être utilisée dans la cartographie géologique à petite échelle, mais ne sert que de point de départ à des études plus classiques; selon Boydell, plusieurs facteurs externes comme les pentes, la végétation ou le drainage affectent la classification spectrale et, d'ailleurs, il n'est pas certain qu'une même méthode de classification puisse servir dans différents types de terrain.

L'approche proposée essaie de résoudre ou de contourner certains problèmes rencontrés en télédétection en adaptant la méthode d'interprétation aux besoins des géologues. Pour ce faire, on a pris en considération l'aspect théorique du traitement des images ainsi que les aspects pratiques de son application en se basant sur les besoins et les problèmes des géologues dans l'analyse des scènes multibandes.

But de l'approche

L'approche proposée a été développée en fonction des besoins des géologues en cartographie des formations en surface. Conscient des limites actuelles des données LANDSAT, il aurait été irréaliste de chercher à supplanter la photo-interprétation classique par le traitement informatique des images multibandes; on a plutôt voulu exploiter les possibilités de la télédétection en combinant les avantages apportés par l'approche traditionnelle et les avantages associés au traitement numérique des données de réflectance. Le traitement et l'interprétation présentés ici découlent donc autant de l'étude théorique des approches utilisées présentement, que des besoins des géologues dans l'analyse des images en vue de la cartographie des formations en surface. L'approche se base donc sur les deux points suivants:

1. Une approche qualitative et quantitative qui cherche à allier les avantages du traitement numérique des signatures tout en conservant l'aspect analogique des textures et des structures des phénomènes. L'utilisation des données numériques MSS permet d'identifier précisément les signatures, d'accentuer certains contrastes entre les phénomènes et de regrouper les signatures en classes spectrales. La reproduction analogique des scènes permet au géologue d'interpréter les phénomènes à partir de ses connaissances géologiques et du contexte géographique dans lequel se situe la région étudiée.

2. Une analyse progressive qui cherche à adapter l'analyse et la cartographie des données au contexte environnemental et spectral. L'analyse est faite d'abord au niveau des signatures afin de connaître la relation spectrale ou texturale qui existe entre les différents phénomènes; deuxièmement, on reproduit les données de façon analogique afin d'identifier les classes spectrales à partir de la structure des phénomènes; enfin, on procède a un regroupement des signatures en classes spectrales selon une classification répondant à la discrimination spectrale et géologique.

Les régions étudiées

Trois régions présentant des contextes environnementaux différents ont été choisies pour illustrer l'utilisation de la télédétection dans le domaine de la cartographie géologique et pour vérifier la méthode proposée. Il s'agit donc de la région des Cantons de l'Est du Québec, de l'île du Roi-Guillaume dans le District de Franklin et du lac Kaminak dans les Territoires du Nord-Ouest (fig. 8).

La scène des Cantons de l'Est chevauche trois régions physiographiques (Bostock 1967): au nord-ouest, le Bouclier canadien (hautes terres laurentiennes), au centre les basses terres du Saint-Laurent et au sud-est, la région des Appalaches. Dans la plaine du Saint-Laurent, la forêt boréale originale (composée de feuillus et de conifères) a fait place à l'urbanisation et l'exploitation agricole. Dans la région du Bouclier et des Appalaches des épinettes blanches, des sapins baumiers et des bouleaux blancs se dressent sur les crêtes recouvertes de sol mince; les dépressions mal drainées sont peuplées de conifères, notamment de thuya, d'épinettes noires et de mélèzes d'Amérique. À la suite de feu ou de coupe forestière, les peupliers, les bouleaux et les cèdres réapparaissent les premiers, peu importe le type de sol dont il s'agit (Rowe 1972). La scène LANDSAT étudiée a été prise le 25 juin 1975.

Le lac Kaminak est situé dans la région physiographique du Bouclier canadien. La roche en place précambrienne se compose principalement de roches cristallines et plutoniques coupées par des dykes de diabase et recouvertes de roches sédimentaires et volcaniques (Davidson 1970; Wright 1967). Le relief relativement faible ne dépasse que rarement 60 m, sauf pour quelques collines rocheuses s'élevant à plus de 100 m. La majeure partie du territoire se trouve au-dessous du niveau maximal (environ 170 m au-dessus du niveau marin actuel) de la mer post-glaciaire de Tyrrell et à l'est de la ligne de partage de l'écoulement des glaciers (Lee 1959). Le paysage est caractérisé par des plaines de till ondulées, parsemées d'affleurements rocheux et d'anciennes plages et recouvertes de nombreux lacs souvent peu profonds. Le principal agent de modification du relief a été l'écoulement des glaciers, processus responsable de la mise en place de vastes étendues de till rocailleux en forme de moraines côtelées à orientation sud-est (Shilts et coll., 1976).

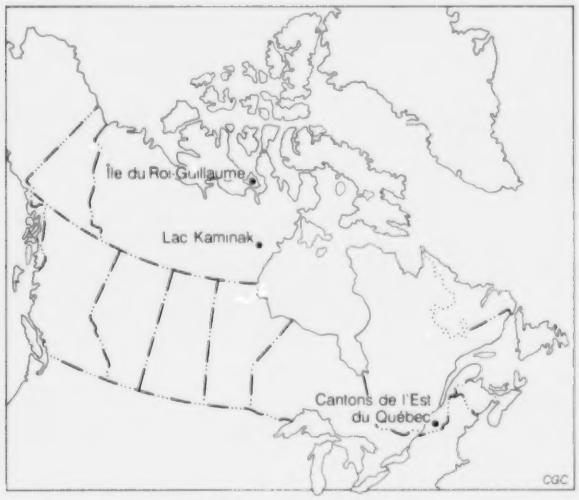

Figure 8. Les régions étudiées.

La végétation de toundra est composée principalement de lichens, linaigrette, bouleau nain, toussac et bruyère. Le climat semi aride (précipitation annuelle inférieure à 25 cm) rend la végétation très dépendante des types de sol et de leur capacité à retenir l'humidité durant l'été. La végétation, haute habituellement de quelques centimètres, peut atteindre 1 m dans certaines vallées humides; les dépôts grossiers et la roche en place, souvent recouverte de blocs (felsenmeer), sont généralement dénudés de toute végétation. La scène LANDSAT a été prise le 21 juillet 1973.

L'île du Roi-Guillaume, située dans le district de Franklin, appartient à la région physiographique des basses-terres de l'Arctique. La roche en place, gélifractée jusqu'à plusieurs mètres de profondeur, se compose essentiellement de carbonates (calcaires et dolomies). Le relief très plat (dénivellation maximale inférieure à 30 m) a été façonné lors de la dernière glaciation par des glaciers continentaux s'écoulant d'abord vers le nord-est puis vers le nord-ouest à la fin du Wisconsinien. Une invasion marine a inondé la totalité de l'île au début de l'Holocène, remaniant les dépôts glaciaires et délavant les régions plus élevées pour redéposer les matériaux plus fins dans les dépressions (Hélie 1984; Bélanger et Hélie 1984).

L'île fait partie de l'écosystème de l'Arctique moyen (Zoltai et coll. 1977); on y retrouve donc une végétation semblable à la région du lac Kaminak mais les espèces d'herbes et de légumineuses y sont moins abondantes. La végétation croît principalement dans les terres basses et mal drainées alors que les crêtes morainiques et la roche en place sont dénudées. La scène Landsat utilisée a été prise le 24 juillet 1977.

L'analyse des signatures

L'analyse des signatures a pour object d'étudier le paysage au niveau spectral, c'est-à-dire d'étudier les relations qui existent entre les différentes composantes du paysage

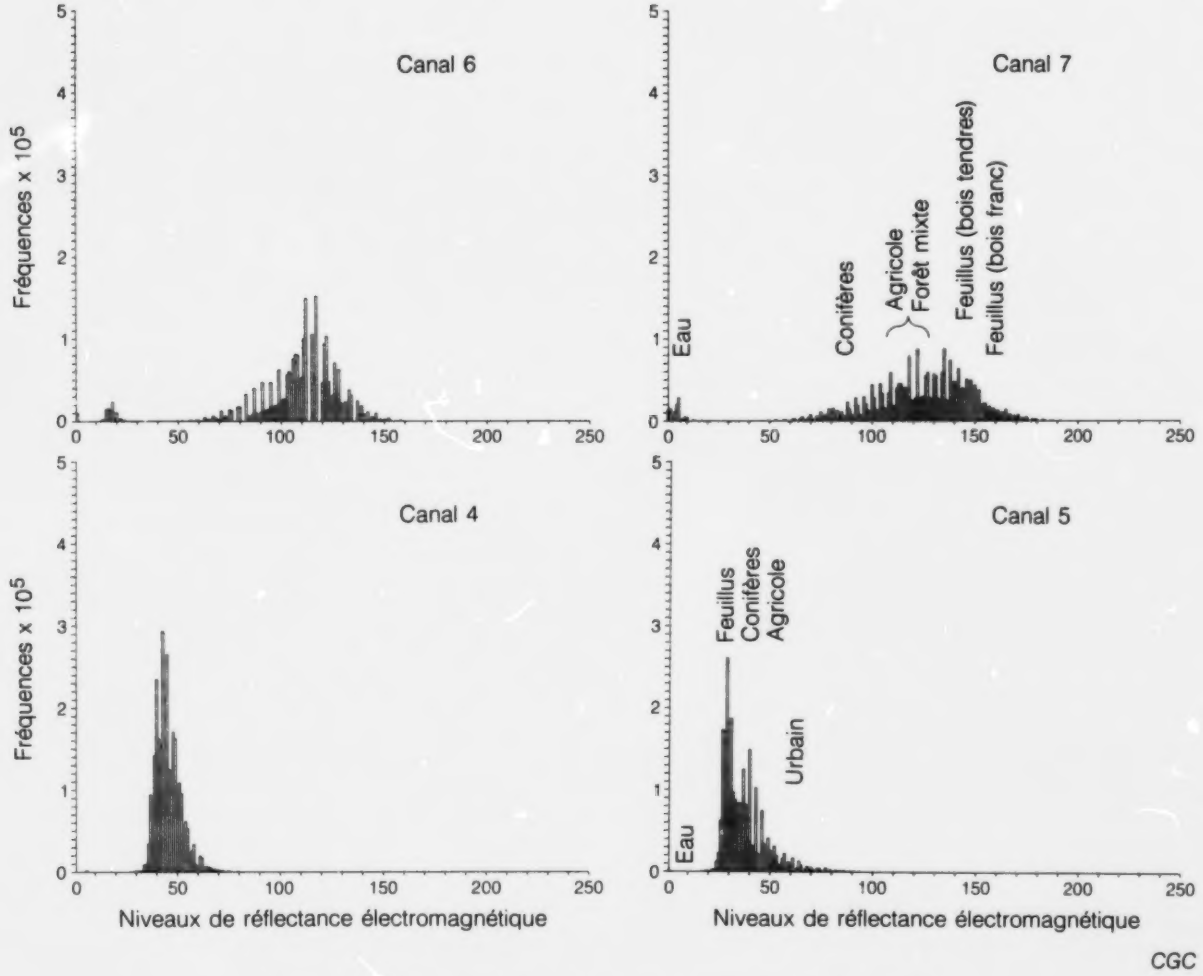

Figure 9. Histogramme de la scène des Cantons de l'Est du Québec.

géographique et les signatures spectrales. Il s'agit d'une première étape de la classification des pixels en se basant principalement sur la discrimination spectrale. Pour ce faire, on considère les signatures comme des vecteurs à trois dimensions, donc chacun des axes correspond à un canal MSS.

Pour faciliter l'étude des relations qui existent entre les signatures spectrales et pour identifier les différents phénonènes apparaissant sur une scène, on aura recours, dans la présente étude, à des corrélogrammes et à des histogrammes, réduisant ainsi à deux dimensions la représentation des vecteurs à quatre dimensions.

Observations

Les histogrammes (fig. 9, 10, 11) servent à montrer la fréquence des pixels (signatures spectrales) pour chacun des niveaux de réflectance (0 à 255) pour une scène ou une région donnée. Les corrélogrammes, ou diagrammes de dispersion, servent à montrer la relation qui existe entre les différents canaux MSS (fig. 12, 13, 14). Les corrélogrammes sont en fait des histogrammes à deux dimensions où chacun des axes correspond à un canal MSS. Sur les corrélogrammes des figures 3, 4, 5 et 12, 13, 14, on, peut observer les points suivants:

1. Seul un nombre limité de nuages (corrélogrammes expliqués aux figures 3, 4, 5) peuvent être clairement distingués: l'eau et les phénomènes terrestres pour les scènes des Cantons de l'Est et du lac Kaminak; l'eau, les phénomènes terrestres et la glace pour la scène de l'île du Roi-Guillaume. Les autres phénomènes sont englobés à l'intérieur de ces nuages.
2. Les corrélogrammes (fig. 12, 13, 14) mettent en évidence la forte corrélation qui existe entre les canaux se rapportant à l'infra-rouge (canaux 6 et 7); ce phénomène indique que ces deux canaux révèlent sensiblement la même information. Le fait que les réflectances sont cependant étalées sur une plus grand distance le long de l'axe du canal 7 que le long de l'axe du canal 6 permet une meilleure séparation de signatures en se basant sur le canal 7.

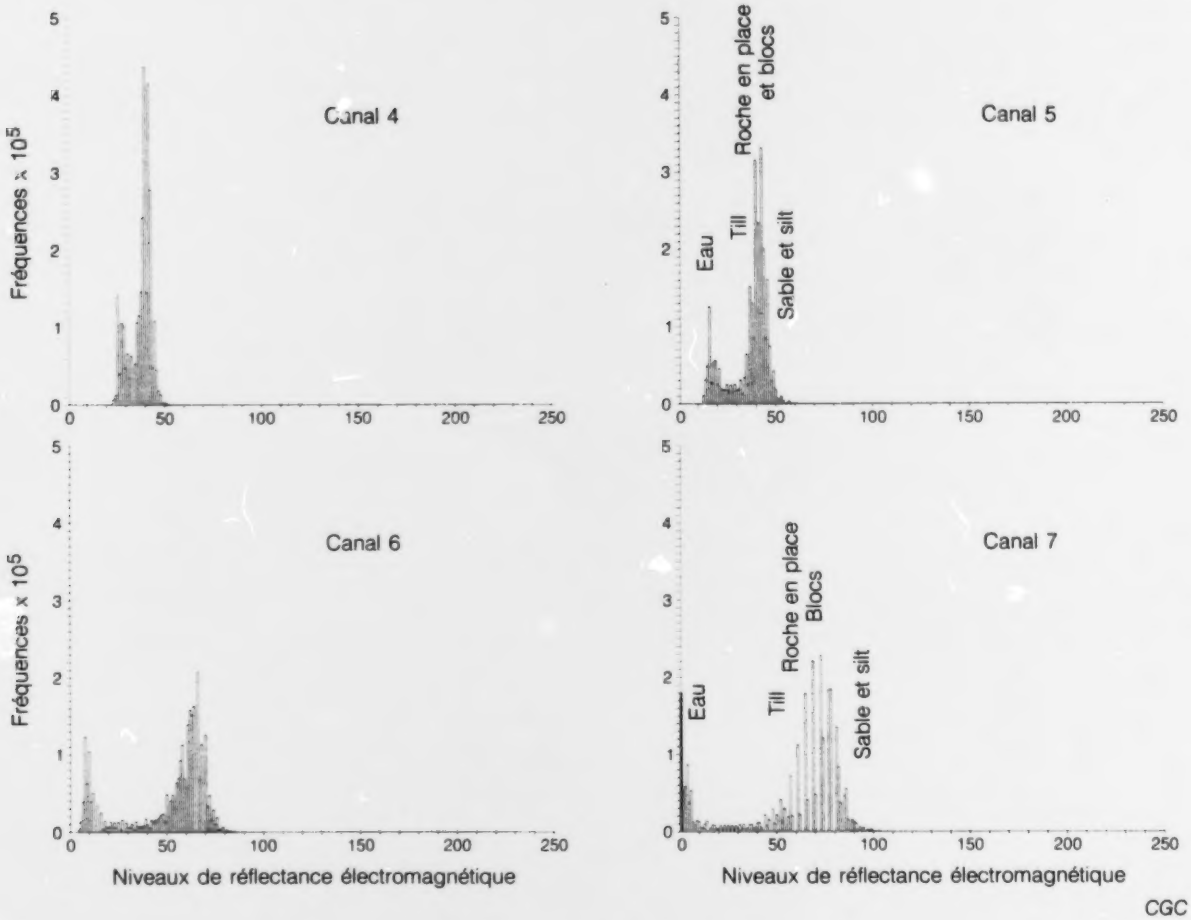

Figure 10. Histogramme de la scène du lac Kaminak.

3. On peut remarquer sur les histogrammes certaines discontinuités dans les courbes de fréquence, souvent caractérisées par une alternance de hautes et de basses fréquences; aussi, sur l'histogramme de la figure 15, les creux sont accompagnés de sommets artificiels et ces derniers peuvent fausser l'analyse de dispersion. Ces anomalies se traduisent sur les corrélogrammes par des vallées rectilignes séparant les nuages (fig. 16). Bien que ces variations pourraient être interprétées statistiquement comme des limites entre des phénomènes distincts, il s'agit en réalité de problèmes mécaniques au niveau des capteurs (Bélanger 1980). Les corrélogrammes des figures 3, 4, 5 et 12, 13, 14 ont été lissés à l'aide d'une moyenne mobile (basé sur trois niveaux de réflectance à la fois) afin de faire disparaître ces frontières artificielles.
4. Les signatures spectrales des différents phénomènes géologiques sont réparties à l'intérieur d'un seul nuage statistique d'allure continue.
5. Bien que la forme des nuages spectraux puisse varier d'une scène MSS à l'autre (fig. 3, 4, 5), la position relative de la signature spectrale des différents phénomènes terrestres demeure constante, quel que soit le contexte environnemental.

Conclusions

1. Dans la classification des pixels, il est important d'analyser la répartition spectrale des signatures afin de pouvoir distinguer les phénomènes séparables spectralement et de savoir où placer les limites entre les classes pour isoler les thèmes voulus.
2. L'imprécision des limites entre les classes et la difficulté de prévoir toutes les classes spectrales et leur signification sur le terrain, exige la formation de classes transitoires et le soin de laisser à l'interprète le choix de rattacher à un thème voulu les classes transitoires à l'aide de données de terrain.

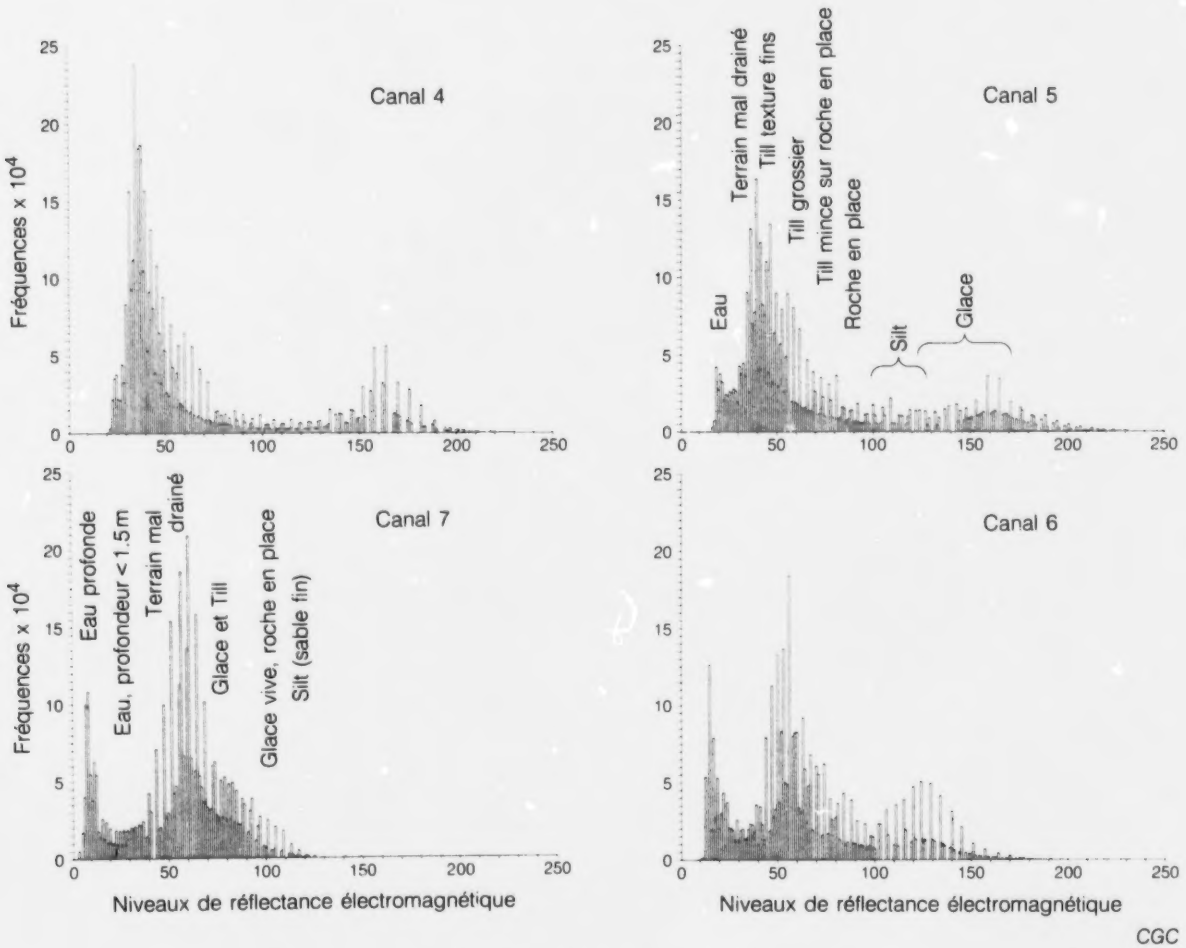

Figure 11. Histogramme de la scène de l'île du Roi-Guillaume.

3. Puisque les phénomènes géographiques (ou géologiques) ne correspondent pas nécessairement à des regroupements discrets sur le plan spectral, mais plutôt à des phénomènes continus, il est important de reproduire les classes spectrales de façon analogique et ainsi permettre de suivre la transition entre les classes.
4. La méthode de classification doit permettre de combiner des signatures spectrales différentes en une même classe pour permettre un regroupement de plusieurs signatures représentant des variations d'un même phénomène.
5. La forte corrélation entre les canaux 6 et 7 permet d'éliminer le canal 6 lors de la classification des signatures et facilite ainsi la classification puisqu'on peut considérer les signatures comme des vecteurs à trois dimensions.

Les cartes analogiques

Alors que l'analyse des corrélogrammes a pour but de saisir la relation texturale qui existe entre les différentes classes spectrales, l'analyse de la carte analogique a pour objet d'étudier le paysage spectral à partir de la structure des classes. Cette dernière, rendue par une reproduction analogique des données spectrales, vise à révéler les différentes formes du paysage et de permettre au géologue de faire appel à son expérience, conjuguée au contexte régional, pour identifier certaines classes spectrales qui ont pu passer inaperçues lors de l'étude des textures.

Production de la carte

Pour obtenir la reproduction analogique des images, on utilise trois canaux MSS auxquels ont été assignées les trois couleurs primaires (jaune, cyan et magenta), puis il

s'agit de faire correspondre l'intensité des couleurs aux niveaux de réflectance. On a généralement recours aux canaux 4, 5 et 7 à cause de la forte corrélation déjà mentionée entre les canaux 6 et 7. Pour assurer un maximum de contraste entre les différentes classes spectrales et faire correspondre les classes spectrales à des thèmes géographiques, il faut faire coïncider les changements de teintes avec les limites des classes spectrales. En procédant ainsi, chaque classe spectrale correspond à une boîte à l'intérieur de l'hyperboîte formée par les trois canaux MSS; en termes informatiques, chaque classe spectrale correspond à une variable d'une matrice à trois dimensions (fig. 17). Cette façon de procéder permet non seulement d'identifier sur l'image des classes définies à l'avance à l'aide de corrélogrammes, mais permet de suivre l'évolution des classes transitoires situées entre les classes spectrales mieux définies. Les classes transitoires peuvent être soit rattachées à des thèmes géographiques ou laissées telles quelles si elles ne correspondent pas à un thème précis.

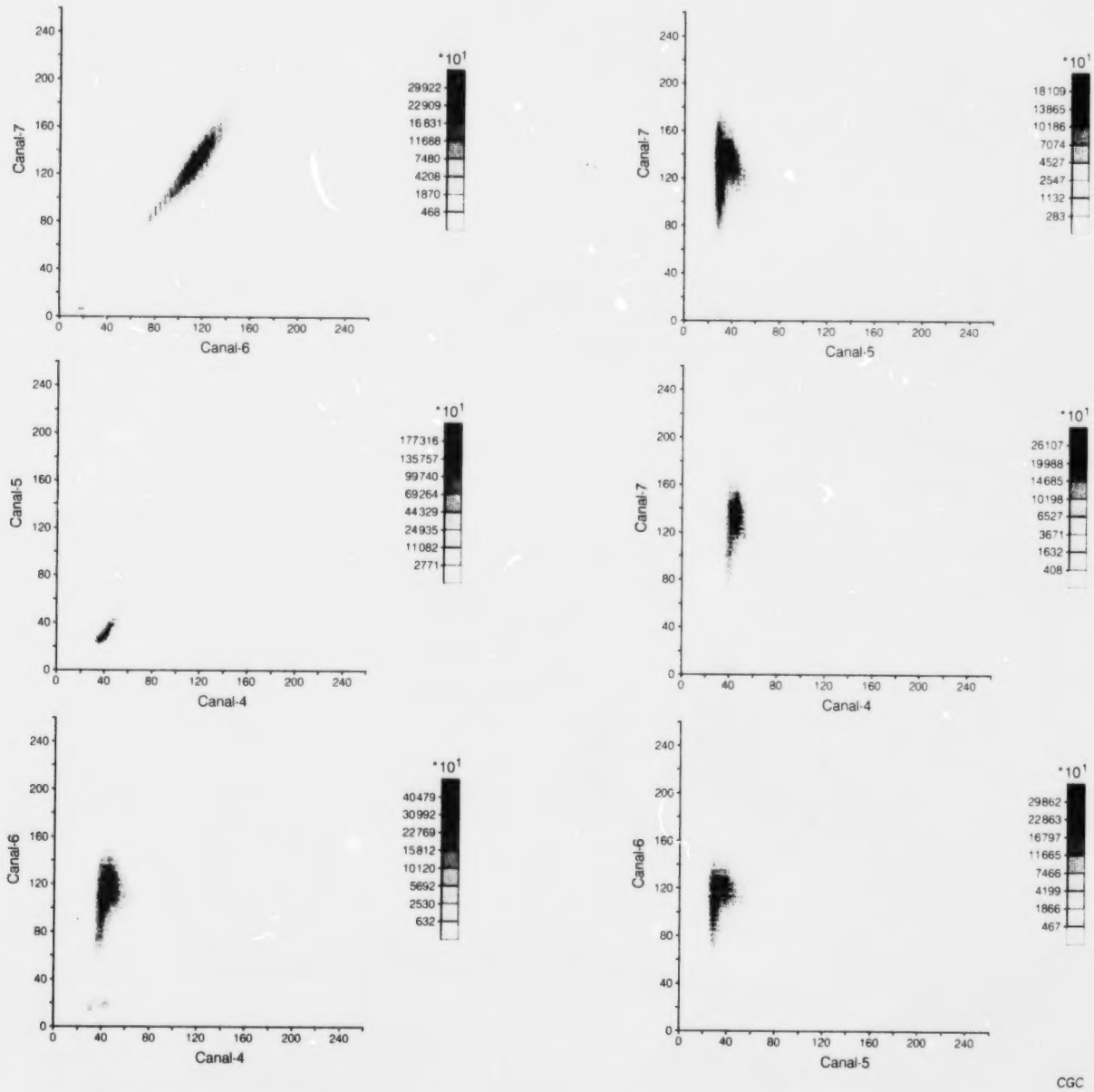

Figure 12. Corrélogrammes de la scène des Cantons de l'Est du Québec. La forte corrélation entre les canaux 6 et 7 est à noter.

Le choix des classes

Ce dernier se fait à l'aide des histogrammes et des corrélogrammes. Lorsqu'il s'agit de scènes pour lesquelles aucune donnée de terrain n'est disponible, le choix des classes se fait uniquement à partir de la forme des nuages et des histogrammes. Dans le cas de la scène de l'île du Roi-Guillaume, il est déjà possible à l'aide des corrélogrammes d'isoler les nuages correspondant à l'eau, la glace et la terre; il s'agit donc de subdiviser le nuage correspondant aux phénomènes terrestres en plusieurs classes afin de faire ressortir le plus grand nombre de thèmes géologiques possibles.

Lorsque les phénomènes se fondent en un seul nuage continu (comme sur la scène des Cantons de l'Est) le choix des classes se fait plus difficilement et l'approche utilisée correspond à un simple étirement de l'histogramme. En se basant sur l'expérience, il est cependant possible de déterminer sur l'histogramme et les corrélogrammes la position relative de plusieurs phénomènes terrestres et de placer les limites des classes de façon à faire ressortir les phénomènes voulus.

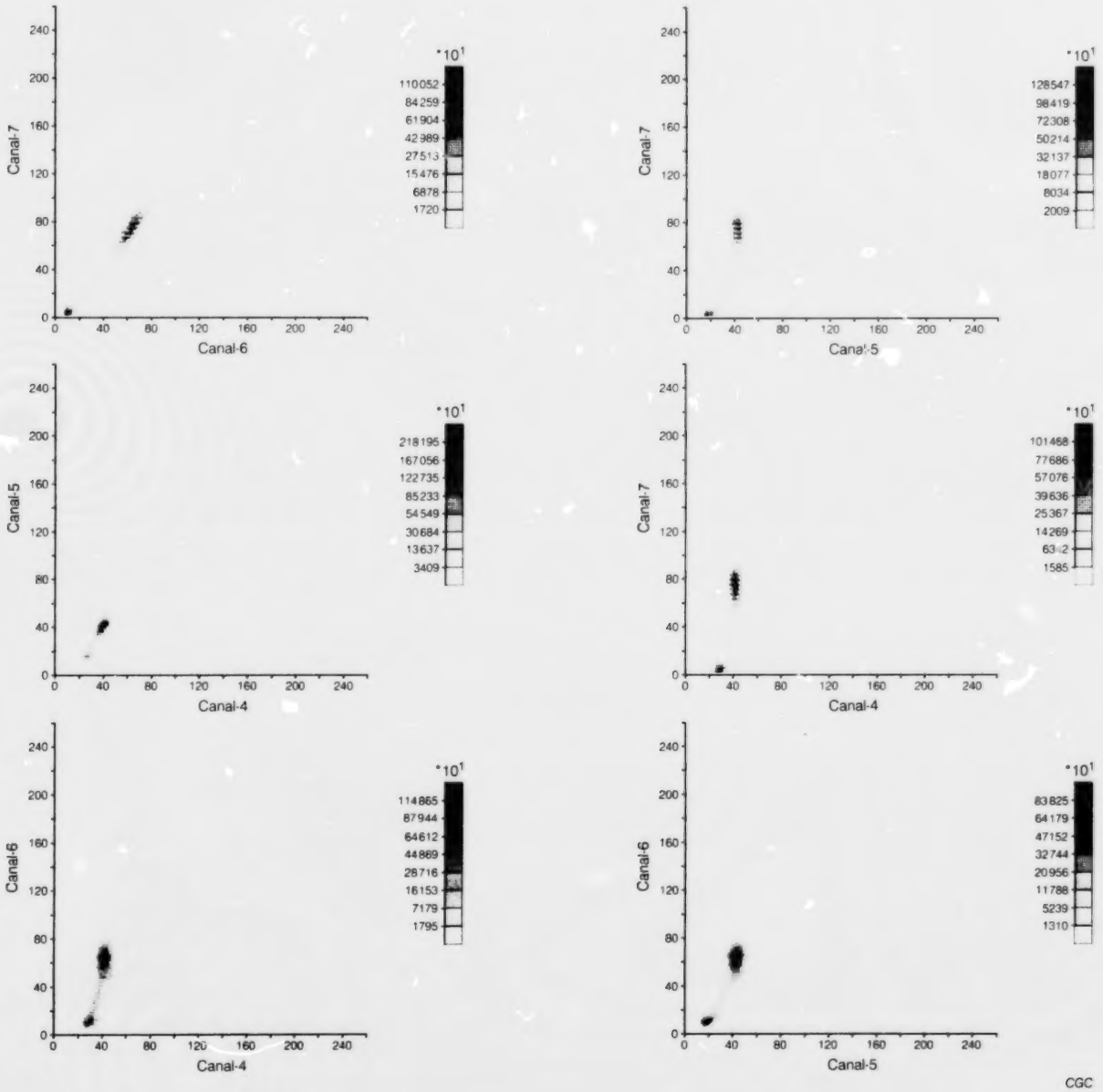

Figure 13. Corrélogrammes de la scène du lac Kaminak.

Le nombre de classes

Ce facteur dépend du type de logiciel et des organes de sortie utilisés pour la reproduction des données. Dans le présent cas, deux types de sorties ont servi: un traceur polychrome (APPLICON) et le système photographique CIR (colour image reproducer). Le logiciel du traceur APPLICON ne permet qu'un maximum de 100 couleurs différentes alors que le système CIR permet une reproduction des 256 niveaux pour chacun des trois canaux utilisés. Il faut noter ici que le système CIR reproduit les scènes en se servant de la méthode additive (c'est-à-dire rouge + bleu + vert = blanc) alors que le traceur APPLICON emploie l'approche soustractive (cyan +

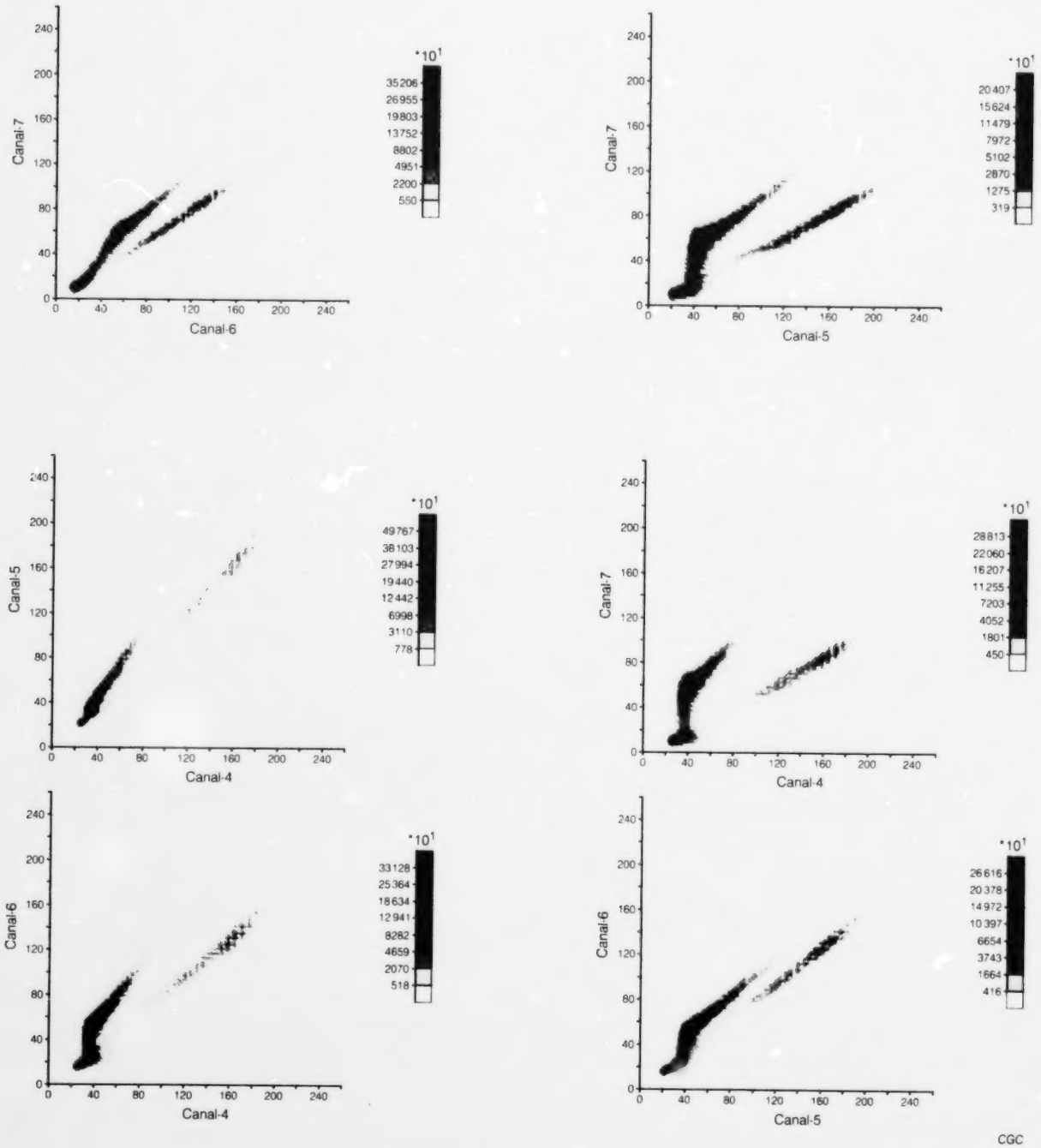

Figure 14. Corrélogrammes de la scène de l'île du Roi-Guillaume.

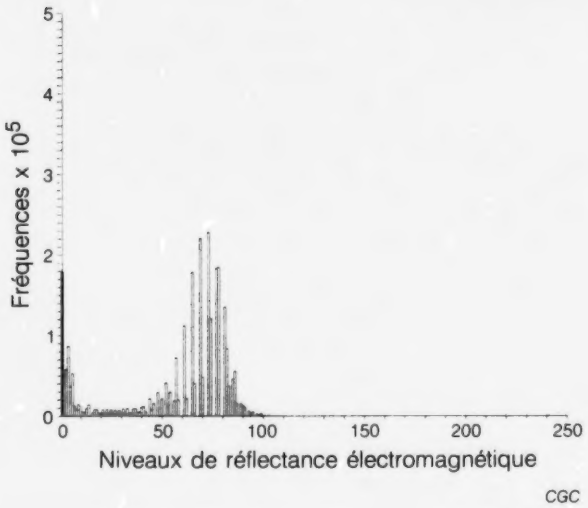

Figure 15. Anomalies, sur un histogramme, dans la réflectance des pixels. L'alternance de basses et hautes fréquences est due à des anomalies dans l'enregistrement des signatures spectrales.

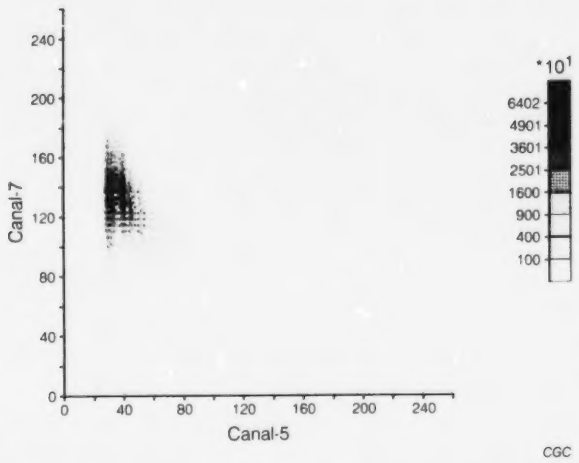

Figure 16. Anomalies, sur un corrélogramme, dans la réflectance des pixels. L'alternance de basses et hautes fréquences est due à des anomalies dans l'enregistrement des signatures spectrales.

magenta + jaune = noir); cette distinction explique les différences au niveau des couleurs des deux types de reproduction.

Analyse des cartes analogiques

Les trois scènes étudiées ont été reproduites (fig. 18, 19, 20) à l'aide du traceur polychrome APPLICON en utilisant la méthode décrite au paragraphe précédent. Les classes ont été formées selon le regroupement suivant:

Canal:	Niveaux de réflectance			
Scène des Cantons de l'Est				
4 : 0 à 32	33 à 41	42 à 47	48 à 255	
5 : 0 à 22	23 à 30	31 à 35	36 à 50	51 à 255
7 : 0 à 30	31 à 86	87 à 120	121 à 150	151 à 255
Scène du lac Kaminak				
4 : 0 à 30	31 à 35	36 à 40	41 à 45	46 à 255
5 : 0 à 30	31 à 40	41 à 45	46 à 255	
7 : 0 à 40	41 à 60	61 à 70	71 à 80	81 à 255
Scène de l'île du Roi-Guillaume				
4 : 0 à 35	36 à 45	46 à 60	61 à 120	121 à 255
5 : 0 à 40	40 à 50	51 à 70	71 à 255	
7 : 0 à 30	31 à 50	51 à 70	71 à 90	91 à 255

La reproduction analogique

Sur les trois scènes, même s'il s'agit de contextes géographiques différents, on remarque une certaine constance entre les thèmes dégagés et les couleurs correspondantes (l'eau en noir, la végétation en vert, le roc en rouge, le sable en blanc, etc.). Même s'il s'agit d'une reproduction en fausses couleurs, il est possible de présenter un paysage familier où l'on retrouve une certaine constance entre les couleurs et les phénomènes, facilitant ainsi l'interprétation du paysage. Sur les cartes produites à l'aide de la classification spectrale non dirigée (méthode des composantes principales; Taylor 1973), la relation couleur-thème est moins évidente, voire inexistante, à cause de la nature discrète des classes et le manque d'analogie entre les couleurs et les thèmes (fig. 6; Bélanger et Rencz 1984), facteurs qui rendent l'interprétation plus difficile.

La discrimination

Certaines classes correspondant à des nuages définis peuvent être facilement identifiés sur les corrélogrammes alors que d'autres classes peuvent passer inaperçues parce qu'elles sont dissimulées à l'intérieur de nuages plus importants. La reproduction analogique peut faire ressortir certaines classes moins importantes par le regroupement en classes spectrales des différentes sous-classes définies au niveau de chacun des canaux. Certaines de ces classes correspondent à une simple variation d'un thème principal et s'avèrent souvent superflues, comme les différents types de glaces ou de profondeurs d'eau; cependant, la discrimination spectrale peut faire ressortir certaines variations d'un même thème, source d'une information importante, en établissant, par exemple, la distinction entre les tills grossiers bien drainés et les tills composés de matériaux fins et mal drainés, ou entre la roche en place et les champs de blocs. Il est donc important de faire ressortir les classes moins importantes et de laisser au géologue le choix d'éliminer ou de regrouper les classes non désirées, soit celles qui ne fournissent pas les renseignements géologiques voulus.

Le rôle des indicateurs géobotaniques

En télédétection, il est important de pouvoir interpréter les formations géologiques à partir de la couverture végétale puisque la classification spectrale se rapporte aux phénomènes apparaissant à la surface du globe, donc en grande partie à la végétation. Dans les régions nordiques, les indicateurs géobotaniques peuvent jouer un rôle important puisqu'il existe une relation étroite entre la végétation et la nature des différentes formations géologiques de surface (Edlund 1982).

Dans les régions méridionales du pays (comme celle des Cantons de l'Est) il est difficile d'établir une relation précise entre les formations géologiques et la végétation en raison, d'une part, du climat tempéré et des sols bien développés qui permettent la croissance d'une grande gamme de végétation souvent indépendante de la nature des sols et, d'autre part, de l'activité humaine (urbanisation, exploitations minière et agricole, reboisement) qui a changé l'équilibre original du milieu biophysique. Dans la légende de la scène des Cantons de l'Est (fig. 18), il est possible de distinguer plusieurs types de végétation et d'associer certaines espèces à certaines conditions de terrain (p. ex., les bois francs sur les sols bien drainés et les conifères dans le fond des vallées moins bien drainées); il demeure cependant que la discrimination spectrale s'apparente beaucoup plus à un inventaire de l'utilisation du sol qu'à un exercice de cartographie géologique.

Sur les scènes du lac Kaminak et de l'île du Roi-Guillaume, l'étude de la végétation permet de différencier les différents types de formations et de comprendre les variations des signatures spectrales à l'intérieur des classes. Par exemple, dans la légende du lac Kaminak (fig. 19) il est possible de différencier les tills des autres formations, puis de subdiviser les tills en fonction de leur texture et du drainage, puisque ceux-ci supportent des associations végétales différentes et dotées de signatures spectrales individuelles; l'interprète peut donc conserver les tills en classes distinctes ou les regrouper selon les besoins en ayant recours à la méthode utilisée dans l'analyse de cartes thématiques (voir cette section plus loin).

Une classification exhaustive

La méthode analogique proposée permet de classer toutes les signatures puisqu'elle ne cherche pas à ajuster la discrimination spectrale à une structure statistique ou à une discrimination définie à l'avance à l'aide de données de terrain. Les classes non prévues représentent habituellement une partie très limitée de la superficie totale mais peuvent avoir une signification importante, qu'il s'agisse de classes transitoires ou de phénomènes distincts. Les courbes cumulatives de la figure 21 servent à démontrer que plus de 90 % de la superficie d'une scène est représentée par moins de 20 classes spectrales; les autres classes forment des classes transitoires ou correspondent à des phénomènes de faible superficie qui peuvent néanmoins être importants sur le plan géologique ainsi, par exemple, la classe 100 sur la figure 19 (lac Kaminak) ne couvre qu'une superficie de 0,24 % de la scène mais correspond précisément à des sédiments marins.

Des classes continues

L'approche analogique reproduit les classes spectrales comme des phénomènes continus et permet ainsi de suivre l'évolution des classes à partir des variations dans les teintes et les couleurs de l'image. Cette approche permet premièrement de reproduire les phénomènes connexes par des couleurs semblables (comme les différents tills sur la scène du lac Kaminak), deuxièmement de faciliter l'interprétation en montrant une certaine gradation entre les classes (la roche saine en rouge, les champs de blocs en orangé et le till mince en brun orangé, etc.), et troisièmement de dépasser l'interprétation directe des signatures en se servant du contexte environnant (lorsque la largeur des eskers ou des moraines est inférieure à celle d'un pixel, la signature de ceux-ci tend à se rapprocher de la signature des phénomènes adjacents). Lorsque les signatures n'appartiennent à aucune classe définie, les méthodes non dirigées tendent à créer de nouvelles classes discrètes (fig. 6, 7) et les méthodes dirigées tendent à les ignorer (Rencz et Shilts 1981), alors qu'en se servant du contexte environnant tel que présenté sur les cartes analogiques, il est possible de suivre l'évolution des formations et d'identifier ces signatures (fig. 22).

Commentaires sur les scènes étudiées

Les contextes géographiques différents dans lesquels se trouvent les trois scènes étudiées permettent d'établir certaines grandes lignes quant au type d'information qu'il est possible d'extraire des images et à la façon d'élaborer la légende.

Cantons de l'Est (fig. 18):

1. Malgré la forte influence de l'activité humaine sur le paysage, il est possible de distinguer clairement les

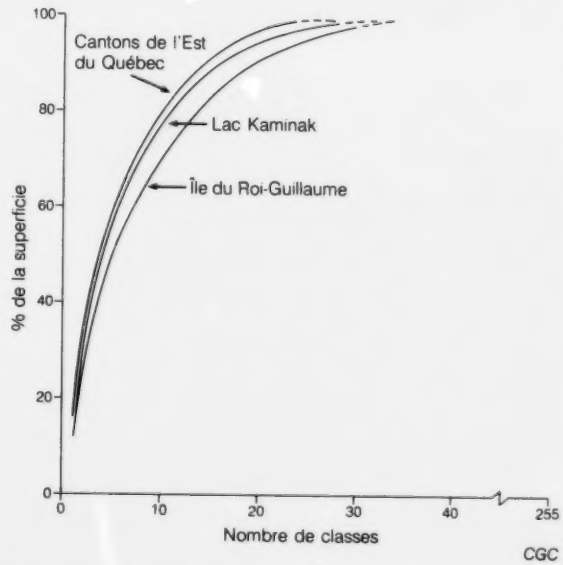

Figure 21. Superficie de la carte couverte par les classes spectrales.

roches cristallines du socle précambrien situé au nord-ouest de l'image, la plaine du Saint-Laurent au centre et la région appalachienne au sud-est.

2. Bien que certaines structures de la roche en place soient visibles sur la scène de LANDSAT, les formations du Quaternaire sont beaucoup moins évidentes en raison de l'exploitation agricole et urbaine observée principalement dans les vallées et la plaine du Saint-Laurent.

3. Les classes spectrales identifiées sur cette scène (fig. 18) portent beaucoup plus sur la végétation (souvent indépendante du sol sousjacent) et l'exploitation humaine que sur la géologie.

4. Une étude détaillée de la scène permettrait sans doute d'établir une certaine relation entre la géologie des formation en surface et les classes spectrales. Il s'agirait là d'un exercice utile à la vérification de la méthode, mais cette approche serait contraire au but des études géologiques réalisées à partir de scènes obtenues par télédétection puisqu'il faudrait partir de données de terrain pour en arriver à interpréter la scène MSS, et non l'inverse comme il se doit.

Le lac Kaminak (fig. 19):

1. Grâce aux liens étroits existant entre le type de végétation et la nature du sol, et dû à l'abondance de la végétation arctique dans cette région, il est possible d'identifier plusieurs formations à partir des signatures spectrales.

2. Puisque les classes sont basées sur la signature spectrale des formations, il faut se servir d'une légende conçue de façon à expliquer les facteurs influençant la signature spectrale des objets perçus par les capteurs plutôt qu'une légende thématique semblable aux légendes habituelles que l'on retrouve sur les cartes géologiques.

3. Dans une région où il existe une forte discrimination spectrale entre les phénomènes, comme sur la scène du lac Kaminak, une simple accentuation des contrastes suffit à faire ressortir les différentes formations géologiques.

L'île du Roi-Guillaume (fig. 20):

1. Cette scène présente beaucoup moins de contraste que les deux autres scènes à cause de l'homogénéité de la végétation (plus restreinte que sur la scène du lac Kaminak), de la roche en place et des formations en surface. Cette uniformité au niveau de la végétation et de la roche en place se traduit sur le corrélogramme par une forte corrélation entre les canaux 4 et 5 (fig. 14).

2. Malgré le peu de discrimination spectrale entre les différentes formations, il est possible d'interpréter la géologie de surface grâce à la structure très caractéristique des différentes formations (fig. 22).

Conclusions

1. L'imprécision des données de télédétection ne permet pas la production de cartes géologiques basées uniquement sur les signatures spectrales; l'interprète doit intervenir dans la formation des classes en se servant autant de la signature spectrale que de la structure des phénomènes et du contexte environnant.

2. Les données spectrales doivent être produites de façon analogique afin de conserver la structure des phénomènes, de faciliter l'interprétation et de conserver une certaine constance dans la reproduction des images.

3. Le contexte environnemental joue un rôle important dans l'interprétation géologique des scènes. Dans les régions caractérisées par une végétation suffisamment développée et étroitement liée à la nature du sol (p. ex. le lac Kaminak), il est possible d'interpréter une grande partie de la géologie de surface à partir d'une simple accentuation des images MSS. Cependant, lorsque la végétation ne réussit pas à accentuer les contrastes entre les différents types de sol, comme sur l'île du Roi-Guillaume, l'interprétation doit se faire principalement à partir de la structure des formations. Dans la région plus au sud, où le sol et la végétation sont développés et que l'activité humaine est importante, les scènes MSS s'avèrent d'une utilité restreinte pour l'étude des formations géologiques du Quaternaire.

4. La résolution plutôt grossière des pixels LANDSAT ne permet pas une analyse détaillée des formations réduites, cependant le peu de distortion et la grande superficie couverte par les scènes font de ces images un outil idéal pour les analyses à l'échelle régionale.

5. La reproduction analogique des scènes MSS ne peut remplacer les cartes thématiques, mais peut servir de document intermédiaire entre les données brutes et la carte interprétée. Il est possible, en combinant le traitement informatique aux connaissances géologiques, de faire ressortir certains phénomènes géologiques sur les scènes MSS mais l'intervention du géologue est nécessaire au niveau de l'interprétation des différentes classes spectrales.

Les cartes thématiques

La carte thématique regroupe les différentes composantes du paysage autour d'un sujet donné. Lorsqu'il est possible d'identifier précisément les données géographiques et que l'analyse porte sur les relations spatiales entre les formes d'origines multiples, comme dans le cas de la photo-interprétation secondée par des études sur le terrain, la production des cartes thématiques pose peu de problèmes. Cependant, lorsqu'il s'agit de données incomplètes comme les signatures spectrales des capteurs MSS, la discrimination entre les phénomènes échappe souvent au contrôle de l'interprète et les classes visibles sur l'image ne répondent pas nécessairement à la classification

voulue. On a pu observer, lors de l'analyse des signatures et des corrélogrammes, qu'il est possible d'accentuer plusieurs types de phénomènes mais que les phénomènes géologiques ne sont pas nécessairement séparables spectralement; en outre, une même formation peut chevaucher plusieurs classes spectrales. Ainsi, le contenu des cartes thématiques géologiques basé uniquement sur la discrimination spectrale dépend largement du contexte géographique et peut varier sensiblement d'un endroit à l'autre. Il est donc nécessaire que le géologue intervienne dans la formation des classes afin d'adapter la discrimination spectrale au contexte géologique.

Les étapes de la cartographie

Formation des classes analogiques. On se sert de la méthode analogique déjà mentionnée afin de faire ressortir un grand nombre de classes spectrales susceptibles de révéler différents aspects de la géologie et de faciliter l'interprétation des classes en se servant du contexte environnant.

Le regroupement des classes. Chacune des classes formée par la méthode analogique correspond à un élément de la matrice à trois dimensions (fig. 17); le regroupement des classes se fait donc en assignant des couleurs semblables aux classes ayant une signification géologique semblable. Ainsi, il est possible de joindre sous un même thème deux ou plusieurs classes spectrales, qu'elles soient adjacentes, éloignées ou même séparées par d'autres classes spectrales ayant une signification différente.

Le choix des couleurs. Sur la carte thématique de type classique, le choix des couleurs peut être arbitraire ou répondre à certaines conventions puisque les classes sont bien définies et que la limite entre les différentes formations sont précises; en télédétection cependant, le choix est plus critique à cause du caractère incomplet des données de base et de l'imprécision des limites entre les classes. Ainsi pour contourner ce problème, on a conservé l'approche de la carte analogique en assignant des couleurs semblables à des phénomènes semblables et des couleurs contrastées aux phénomènes différents sur le plan spectral et géologique.

À titre d'exemple, la scène de l'île du Roi-Guillaume (fig. 22) sert ici à illustrer les avantages de la carte thématique. Il faut cependant mentionner que le regroupement des classes s'est fait à partir uniquement des canaux 5 et 7 (voir fig. 5) à cause du peu d'information supplémentaire apporté par le canal 5, dû à sa forte corrélation avec le canal 4 (fig. 11). Les classes ont été formées autour des thèmes expliqués à la figure 22.

La première étape consiste à dégager les principaux thèmes pouvant être identifiés spectralement et géologiquement, puis à leur assigner des couleurs contrastées. Dans un deuxième temps, on identifie les classes transitoires et on assigne à ces classes des couleurs intermédiaires. On choisit des couleurs intermédiaires pour éviter une alternance de couleurs contrastées dans les régions de transition entre deux formations (ce qui complique l'interprétation comme dans le cas de la figure 6) et pour préserver la structure des formations lorsqu'elles s'étendent sur plusieurs classes spectrales. Il est généralement préférable de conserver une certaine correspondance entre l'intensité de réflectance originale de la classe spectrale et l'intensité des couleurs des thèmes, afin de faciliter l'interprétation des classes transitoires et de corriger certaines imperfections des signatures dues à des problèmes techniques ou autres.

Analyse de la carte thématique (fig. 22)

Le regroupement des classes. Le regroupement thématique des classes spectrales permet d'accentuer les contrastes entre les différents thèmes, mais il faut que le regroupement soit contrôlé par l'interprète afin de faire correspondre (dans la mesure du possible) la discrimination spectrale à des thèmes géologiques. Un découpage différent des corrélogrammes aurait pu faire ressortir des classes ou thèmes différents pouvant répondre aux besoins d'une étude, soit des conditions de la glace, de la profondeur et de la sédimentation des lacs, soit des différents types de végétation. Il est donc important que la méthode permettre à l'utilisateur de regrouper les signatures selon une classification voulue.

Les classes transitoires. Les classes transitoires correspondent à des phénomènes plus difficilement séparables au niveau spectral, mais ayant une signification importante sur le terrain. Ces classes correspondent généralement à des zones grises situées entre les différents noyaux statistiques bien définis. Il est important de conserver les classes transitoires sur la carte thématique à cause de l'imprécision des signatures comme dans le cas d'eskers, de certaines plages ou autres phénomènes (voir la section portant sur l'analyse des cartes analogiques; fig. 7).

L'interprétation. Le regroupement des classes en thèmes facilite la lecture de la carte en simplifiant le paysage et en accentuant les détails de certaines formations géologiques; le regroupement des classes occasionne cependant une perte au niveau de la définition de la structure des phénomènes. Les thèmes dégagés peuvent différer de ceux rélevés sur des cartes thématiques classiques puisque ces dernières sont basées sur la discrimination spectrale des signatures et non déterminées selon une classification géologique telle que présentée dans Hélie (1984).

CONCLUSION

Les images LANDSAT peuvent jouer un rôle important dans la cartographie des formations géologiques de surface, mais l'utilisateur doit être conscient des limites de la discrimination spectrale et doit comprendre non seulement la nature des données de base mais aussi les méthodes de traitement de ces données. La présente étude a

permis de définir le rôle de la télédétection dans la cartographie de la géologie des formations en surface et de dégager certains principes importants dont il faut tenir compte dans le traitement et l'interprétation des données spectrales:

1. Les images MSS de LANDSAT: la résolution grossière des pixels occassionne une perte de définition de l'image et ne permet pas une étude détaillée des formations; le manque de couverture stéréoscopique limite l'interprétation à la texture et à la structure bidimensionnelle des formations géologiques; les signatures incomplètes (limitées à quatre longueurs d'ondes) empêchent une identification précise des objets. D'autre part, le peu de distortion et la grande superficie couverte par les images MSS en font un outil idéal pour des études régionales à des échelles inférieures à 1/125 000.
2. La reproduction des images: contrairement aux cartes thématiques habituelles où chaque composante constitue une unité discrète, les classes spectrales forment des phénomènes continus à limites souvent imprécises. L'interprétation des scènes spectrales se fait autant à partir de la structure des phénomènes que de la texture des classes spectrales, d'où la nécessité de reproduire de façon analogique les scènes spectrales.

   La classification ne peut être basée uniquement sur l'analyse statistique des nuages spectraux mais doit être secondée par des données de terrain afin de voir la correspondance entre la discrimination spectrale et les thèmes géographiques. L'interprète doit non seulement comprendre la marche à suivre pour former les classes spectrales, mais il doit également intervenir dans leur formation; une classification aveugle basée uniquement sur une analyse mathématique peut donner des aberrations au niveau de la formation des classes tandis qu'une classification basée uniquement sur des données de terrain risque de ne pas avoir d'équivalent au niveau spectral et peut, en plus de semer la confusion entre les classes voulues et les classes obtenues, laisser un grand nombre de pixels non classés.
3. L'influence du milieu: la qualité et la quantité de renseignements géologiques apparaissant sur les images de télédétection sont étroitement liées aux facteurs climatiques, topographiques, biophysiques et autres. Dans les régions où la végétation est étroitement liée à la nature du terrain, comme dans les régions nordiques, il est possible d'interpréter une partie importante de la géologie des formations en surface; cependant, dans les régions plus au sud, où la mise en valeur du sol est considérable et où la végétation dépend moins de la nature du sol, la géologie des formations en surface est en grande partie masquée par la végétation et seuls les phénomènes géologiques les plus apparents ressortent sur l'image. Le milieu joue un rôle important dans l'interprétation des scènes MSS car l'interprétation ne se fait qu'à partir des signatures et non à partir de la structure des formes du relief comme dans le cas de la photo interprétation classique.
4. L'interprétation: il est important de baser l'analyse des scènes MSS sur l'approche qualitative et quantitative car le traitement quantitatif des données spectrales permet d'améliorer les images, de définir et de quantifier les signatures et classes spectrales, et de procéder à certaines analyses mathématiques des données. L'analyse qualitative, d'autre part, permet à l'interprète de dépasser l'identification directe des classes spectrales pour identifier les différentes formations géologiques et dresser les cartes thématiques.

Les images LANDSAT ne jouent présentement qu'un rôle limité dans la cartographie des formations géologiques en surface à cause principalement du manque de définition des images et de l'impossibilité d'interpréter les phénomènes à partir des structures tridimensionnelles; cependant, elles peuvent jouer un rôle important dans les régions nordiques puisqu'elles réussissent à donner une vue d'ensemble des formations et aident à reconstituer les différents événements géologiques qui ont façonné le relief.

La venue des satellites a révolutionné le monde de la télédétection, mais il faudra attendre une nouvelle génération de LANDSAT pouvant fournir une couverture stéréoscopique du terrain et une meilleure résolution spectrale et spatiale avant que les images prises par satellite puissent remplacer efficacement les photographies aériennes utilisées jusqu'à présent.

RÉFÉRENCES

Alfodi, T.T.
1978: Introduction to digital images and digital analysis techniques; Energy, Mines and Resources Canada, CCRS Report 78-1.

American Society of Photogrametry
1963: Relationship involved in remote reconnaissance; Photogrametric Engineering 29 (5), p. 761-797.
1960: Manual of photographic interpretation; Washington D.C., 1861 p.

Bélanger, J.R.
1980: Sur la synthèse d'images cartographiques: que signifie la juxtaposition de faibles et de fortes fréquences de pixels dans les histogrammes de niveaux de réflectance?; Recherches Géographiques, N° 8, Laboratoire de Cartographie thématique, Strasbourg, p. 75-86.

Bélanger, J.R. et Hélie, R.
1984: Étude du Quaternaire de l'île du Roi Guillaume à l'aide de la télédétection; 8e Symposium canadien de télédétection, Montréal, 1983, p. 685-694.

Bélanger, J.R., Rencz, A.N.
1984: Comparison of techniques for evaluating surficial geology in remote regions of Canada; 9th Canadian Symposium for Remote Sensing, St. John's, Newfoundland.

Bostock, H.S.
1967: Carte Physiographique du Canada, Commission Géologique du Canada, carte 1254A.

Boydell, A.N.
1974: Evaluation of the potential uses of Earth Resources Technology Satellites (ERTS1) data for small scale terrain mapping in Canada's North; Symposium on Remote Sensing and Photo-interpretation, Banff, Alberta, Canada, p. 329-339.

Braconne, S., Fontanel, A., Guy, M. et Lallemand, C.
1974: Cartographie thématique automatique: Principe et réalisation partielle d'un système; Symposium on Remote Sensing and Photo-interpretation, Banff, Alberta, Canada, p. 631-646.

Bruce, B., and Singhroy, V.
1984: Satellite data for operational mineral exploration — The Canadian experience; IUGS-UNESCO, February 84, Orléans, France.

Brun, F., Fontanel, A., Lalemand, C., Legendre, G., Rivereau, J.C. et Thomas, G.
1974: Comparaison de différentes techniques de classement de données spectrales, application à la géologie; Symposium EFRO, Frascati, p. 303-316.

Condit, C.D., and Chavez, P.S., Jr.
1979: Computerized Digital Image Processing for Geologists, U.S. Geological Survey Bulletin 1462, Washington, D.C.

David, D.G., Joly, G. et Verger, F.
1977: Le traitement par ordinateur des données de télédétection et leur cartographie automatique; 4e Symposium canadien sur la télédétection, Québec, Canada, p. 558-563.

Davidson, A.
1970: Precambrian Geology, Kaminak Lake Map-area, District of Keewatin; GSC paper 69-51.

Edlund, S.A.
1982: Plant communities on the surficial materials of north-central District of Keewatin, Northwest Territories, Energy, Mines and Resources, Paper 80-33, 20 p.

Estes, J.E.
1974: Imaging with phototgraphic and non photographic sensor systems; Remote Sensing, Technique for environmental analyses, Hamilton publ. Co., California, ch pt. 2.

Estes, J.E. and Senger, L.W.
1974: Remote sensing, techniques for environmental analyses; Hamilton Publishing Co., California, 340 p.

Fontanel, A., Lalemand, C., Legendre, F., Rivereau, J.C., Thomas, G.
1976: Comparaison des images et des classifications multispectrales obtenues à partir de satellites Landsat, Skylab, et du scanner aéroporté Daedalus; Journée de télédétection du JDTA, Toulouse, France, p. 459-531.

Gagnon, H.
1974: La photo aérienne, son interprétation dans les études de l'environnement et l'aménagement du territoire; Ed. H.R.W., Montréal, 228 p.

Goodenough, D.
1976: Image 100 classification methods for RTS scanners data; Canadian Journal of Remote Sensing, v.2, No 1, Ottawa.

Hajic, E.J. and Simonett, D.S.
1976: Comparison of Qualitative and Quantitative Image Analysis; Remote Sensing of Environment, chap.II, Addison-Wesley publ.

Harper, D.
1976: Eye in the Sky, Introduction to Remote Sensing; Multi-science Pub. Ltd., Montreal and Information Canada.

Hélie, G.R.
1984: Surficial geology, King William Island and Adelaide Peninsula Districts of Keewatin and Franklin, N.W.T., Geological Survey of Canada, Map 1618A.

Lee, H.A.
1959: Surfical Geology of Southern District of Keewatin and the Keewatin Ice Divide, N.W.T., Geological Survey of Canada, Bull.51.

Lintz, J. and Simonett, D.S.
1976: Remote sensing of environment; Adison Wesley Publishing Company, Reading, Mass., U.S.A.

Lodwick, G.D.
1978: Between scene registration accuracy in Landsat time sequencing, 12th Symposium on Remote Sensing of Environment; Ann Arbor, Michigan, p. 1461-1467.

Reeves, R.J., and Harris, G.jr.
1977: Digital Processing to aid interpretation of Landsat images; Journée de la télédétection du GDTA, St. Mande, France.

Rencz, A.N., and Shilts, W.W.
1981: Surficial geology mapping from Landsat, Kaminak Lake, Northwest Territories; 7th Canadian Symposium on Remote Sensing, Winnipeg, Manitoba, p. 358-363.

Robinove, C.J.
1981: The logic of multispectral classification and mapping of land, remote sensing of environment, v. 11, p. 231-244.

Rowe, J.S.
1972: Forest Regions of Canada; Departement of Environment Canada, Publ. No. 1300.

Saint, G.
1974: Classification supervisée de la zone d'Entressen; CNES Toulouse, France; Campagne du GDTA, p. 421-442.

Shilts, W.W., Arsinault, L., and Kettle, I.M.
1976: Surficial Geology of Eskimo point (55E), Henik Lake (65H), Kaminah Lake (55L) and Dawson Inlet (55F) Shuts, District of Keewatin; Geological Survey of Canada, Open File 356.

Shlien, S., and Goodenough, D.
1974: Quantitative methods for processing the information content of ERTS imagery for terrain classification; Proceedings, 2nd Canadian Symposium on Remote Sensing, Guelph, p. 237-266.

Simonett, D.S.
1974: Quantitative data extraction and analysis of remote sensor images; Remote Sensing Techniques for Environmental Analysis, Estes and Senger Ed., Hamilton Publishing Co., California, Chapter 3.

Steiner, D.
1972: Automatic processing and classification of remote sensing data, Geographical Data Handling, Commission on Geographical Data Sensing and Processing, UNESCO/IGU Symposium, Ottawa, Canada, Chapter III.

Stone, K.
1974: Developing geographical remote sensing; Remote Sensing Techniques for Environmental Analysis; Hamilton Publishing Company, California, U.S.A., p. 1-14.

Taylor, M.M.
1973: Principal components colour display of ERTS imagery; Defence and Civil Institute of Environmental Medicine, Research Paper 73-RP-987A, p. 296-306.

Turner, R.E.
1973: Atmospheric effects in remote sensing; Remote Sensing of Earth Resources, v. III, F., Shahrokhi, Ed.

Wright, G.M.
1967: Geology of the Southeastern Barran Grounds, Parts of the District of Mackenzie and Keewatin, GSC Memoir 350.

Zoltai, S.C., Tarnocai, C., and Pettapiece, U.C.
1977: Age of cryotubated organic materials in earth hummocks from the Canadian Artic; Third International Conference on Permafrost Proceedings, No. 1, p326-331.

MAPS
NOT
FILMED

CARTES
OMISES